

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÜÇ BOYUTLU SICAKLIK ÖLÇÜM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE
UYARLANABİLİR ISITMA MODELLERİNİN ELDE EDİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Doğan Can SAMUK

**NİSAN 2025
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÜÇ BOYUTLU SICAKLIK ÖLÇÜM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE
UYARLANABİLİR ISITMA MODELLERİNİN ELDE EDİLMESİ**

Doğan Can SAMUK

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 / 03 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 07 / 04 / 2025

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR
ORCID : - - -

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Üç Boyutlu Sıcaklık Ölçüm Sisteminin Gerçekleştirilmesi ve Uyarlanabilir Isıtma Modellerinin Elde Edilmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasında elektrikli ısıtıcıların üç boyutlu ısıtma ve matematiksel modellerinin çıkarılması için yeni bir sıcaklık ölçüm sistemi gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışmalarda fanlı ısıtıcı kullanılarak ısıtıcı dizileri için matematiksel model yardımıyla uyarlanabilir ısıtma modelleri elde edilmiştir.

Tez çalışmam boyunca konu seçimi ve yapılan çalışmaların yürütülmesinde bana her türlü desteği ve kolaylığı sağlayan, kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle karşılaştığım tüm zorlukları aşmamda bana yardımcı olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR’a teşekkürlerimi saygı ve minnetle sunarım. Ayrıca tez izleme sürecinde yer alan ve yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime katkıda bulunan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK ve Dr. Öğr. Üyesi Emrah BENLİ’ye teşekkürü borç bilirim.

Tüm eğitim ve öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve bugünlere gelmemdeki en büyük paya sahip olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak, bu süreçte gösterdiği sabır, hoşgörü ve anlayışından ötürü sevgili eşim Şeyma YILDIRIM SAMUK’a tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım. Beni her zaman motive ettiğin, desteklediğin ve yanımda olduğun için minnettarım.

Bu tez çalışmasının, konu ile ilgili gelecekteki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Doğan Can SAMUK

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Üç Boyutlu Sıcaklık Ölçüm Sisteminin Gerçekleştirilmesi ve Uyarlanabilir Isıtma Modellerinin Elde Edilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 07/04/2025

Doğan Can SAMUK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Araştırması.....	2
1.2.1. Endüstriyel Uygulamalar.....	3
1.2.2. Sıcaklık Ölçüm Sistemleri.....	6
1.2.3. Mikrodalga Isıtma	12
1.2.4. Yenilikçi Ölçüm Teknolojileri	14
1.3. Tezin Kapsamı ve Amacı.....	18
1.4. Ara Değer Hesabı.....	19
1.4.1. Makima Ara Değer Hesabı.....	20
1.5. Matematiksel Modelleme	21
1.6. Gauss Dağılım Fonksiyonu.....	21
1.7. Dört Parametrelili Lojistik Fonksiyonu	22
1.8. Hata Tabanlı Performans Değerlendirme Metrikleri	23
1.8.1. Ortalama Mutlak Hata	23
1.8.2. Hata Kareleri Toplamı.....	24
1.8.5. Ortalama Karesel Hata	24
1.8.4. Kök Ortalama Karesel Hata	25
1.8.5. R-Kare	25
1.9. Optimizasyon Algoritmaları	26

1.9.1. Radyal Hareket Optimizasyonu.....	26
1.9.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu	29
1.9.3. Mayıs Sineği Optimizasyonu	31
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	35
2.1. Teorik Çalışmalar	35
2.1.1. Ölçüm Sisteminin Tasarımı.....	35
2.1.2. Algılayıcı Devre Kartının Tasarımı.....	36
2.1.3. Arayüz Devre Kartının Tasarımı	40
2.2. Deneysel Çalışmalar	41
2.2.1. Algılayıcı Devre Kartının Gerçekleştirilmesi.....	42
2.2.2. Ölçümün Çözünürlük Analizi	43
2.2.3. Arayüz Devre Kartının Gerçekleştirilmesi.....	45
2.3. Ölçüm Sisteminin Gerçekleştirilmesi	47
2.3.1. STM32F407 Discovery Denetleyici Kartı.....	50
2.4. Fanlı Isıtıcının Matematiksel Modeli.....	53
2.5. Dizi Ölçüm Sonuçları	65
2.5.1. İki Isıtıcı Diziler	65
2.5.2. Üç Isıtıcı Diziler.....	70
2.5.3. Dört Isıtıcı Diziler	75
2.5.4. Beş Isıtıcı Diziler.....	80
2.5.5. Altı Isıtıcı Diziler	85
2.6. Optimizasyon Algoritmaları ile Uyarlanabilir Isıtma Modellerinin Oluşturulması.....	91
2.6.1. İki Isıtıcı Diziler için Oluşturulan Uyarlanabilir Isıtma Modelleri	92
2.6.2. Üç Isıtıcı Diziler için Oluşturulan Uyarlanabilir Isıtma Modelleri.....	97
2.6.3. Dört Isıtıcı Diziler için Oluşturulan Uyarlanabilir Isıtma Modelleri.....	102
2.6.4. Beş Isıtıcı Diziler için Oluşturulan Uyarlanabilir Isıtma Modelleri.....	107
2.6.5. Altı Isıtıcı Diziler için Oluşturulan Uyarlanabilir Isıtma Modelleri	113
3. SONUÇLAR.....	119
4. ÖNERİLER	121
5. KAYNAKLAR.....	122
6. EKLER	130
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

ÜÇ BOYUTLU SICAKLIK ÖLÇÜM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE UYARLANABİLİR ISITMA MODELLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Doğan Can SAMUK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ÇAKIR
2025, 129 Sayfa, 20 Sayfa Ek

Elektrikli ısıtıcılar, taşınabilirlik, hızlı ısıtma, kullanım kolaylığı ve güvenilirlik gibi avantajlarından dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptir. Isıtıcıların yaygın olarak kullanılması verimlilik ve enerji tasarrufu gibi konularda doğru ısıtıcı seçimini önemli hale getirmektedir. Bu tez çalışmasında daha verimli ve amaca uygun ısıtıcı tasarımı ve üretimine olanak sağlayacak üç boyutlu sıcaklık ölçüm sistemi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sisteminde $0,0489\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyetinde sıcaklık değişimini algılayabilen yeni bir algılayıcı devre yapısı sunulmuş ve 81 algılayıcı devre kartı kullanılmıştır. Algılayıcılar xy düzleminde 9×9 matris diziliminde iki boyutlu olarak konumlandırılmış ve ısıtıcının z ekseninde dikey hareket ettirilmesi ile üç boyutlu ısıtma modelleri elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda fanlı bir ısıtıcıdan elde edilen ısıtma modelleri kullanılarak, ısıtıcının matematiksel modeli çıkarılmıştır. Modelin başarımı 15 farklı ısıtıcı dizisi için hata tabanlı performans değerlendirme kriterleri ile ortaya konmuştur. Buna göre tüm diziler için matematiksel model ve ölçüm sonuçları arasındaki ortalama mutlak hataların ve R^2 uyumluluk değerlerinin ortalaması sırasıyla $0,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\%98,18$ olarak hesaplanmıştır. Ardından ölçüm sisteminden bağımsız olarak matematiksel model yardımıyla farklı ısıtıcı sayıları ve dizilimleri ile oluşturulan referans modeller için radyal hareket, parçacık sürü ve mayıs sineği optimizasyon algoritmaları kullanılarak, uyarlanabilir ısıtma modelleri elde edilmiştir. Sonuçlar optimizasyon yöntemlerinin, referans ısıtıcı konumlarını ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafeyi başarılı bir şekilde tespit edebildiğini açıkça ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Sıcaklık ölçüm sistemi, Üç boyutlu ısıtma modelleri, Matematiksel modelleme, Uyarlanabilir ısıtma

PhD. Thesis

SUMMARY

THE REALIZATION OF A THREE-DIMENSIONAL TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEM AND DEVELOPMENT OF ADAPTIVE HEATING MODELS

Dogan Can SAMUK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Oguzhan CAKIR
2025, 129 Pages, 20 Pages Appendix

Electric heaters have a wide range of applications due to their advantages, including rapid heating, portability, ease of use, and reliability. The widespread use of electric heaters makes the correct selection of heaters crucial in terms of efficiency and energy savings. In this thesis study, a temperature measurement system has been developed to enable the design and production of more efficient and purpose-oriented heaters. The measurement system incorporated a novel sensor circuit structure capable of detecting temperature variations with a sensitivity of $0.0489\text{ }^{\circ}\text{C}$, and 81 sensor circuit boards were used. The sensors were positioned in a two-dimensional 9×9 matrix arrangement on the xy plane, and by vertically moving the heater along the z -axis, three-dimensional heating models were obtained. In the experimental studies, heating models obtained from a sample fan heater were first used to derive the mathematical model of the heater. The model's performance was evaluated using error-based performance assessment criteria for five different heater configurations. Accordingly, the mean absolute error between the mathematical model and the measurement results was calculated as $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}$, with an R^2 compatibility value of 98.18%. Subsequently, independent of the measurement system, adaptive heating models were obtained using radial movement, particle swarm, and mayfly optimization algorithms for reference models created with different numbers and configurations of heaters using the mathematical model. The simulation results demonstrated that the optimization methods successfully identified the heater positions and the distances between the heaters and the sensor array.

Key Words: Temperature measurement system, Three-dimensional heating patterns, Mathematical modeling, Adaptive heating

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. μ ve σ^2 değerleri için örnek Gauss dağılımları	22
Şekil 2. Örnek dört parametrelili lojistik fonksiyonu eğrileri.....	23
Şekil 3. RHO algoritmasının akış diyagramı.....	28
Şekil 4. PSO algoritmasının akış diyagramı.....	31
Şekil 5. MSO algoritmasının akış diyagramı.....	33
Şekil 6. Ölçüm sisteminin üç boyutlu tasarımı (a) önden görünüm (b) yandan görünüm ..	35
Şekil 7. Ölçüm sisteminin üç boyutlu tasarımının perspektif görünümü	36
Şekil 8. Algılayıcı devre kartının şematik çizimi	37
Şekil 9. PT100 sıcaklık algılayıcısı	37
Şekil 10. PT100 için yapılan eğri uydurma grafiği	40
Şekil 11. Arayüz kartının şematik gösterimi	41
Şekil 12. Algılayıcı devresinin baskı devre kartı (a) üstten görünümü (b) alttan görünümü	43
Şekil 13. Arayüz devresinin baskı devre kartının genel görünümü (a) üstten (b) alttan	45
Şekil 14. Ölçüm sisteminin genel blok şeması	47
Şekil 15. Gerçekleştirilen üç boyutlu ölçüm sisteminin genel görünümü	48
Şekil 16. Ölçüm sisteminin temel bileşenleri (a) STM32F407 mikrodnetleyici ve arayüz kartı (b) algılayıcı dizisi (c) fanlı ısıtıcı dizisi (d) röle kontrol kartları.....	49
Şekil 17. STM32F407 denetleyici kartı.....	50
Şekil 18. STM32F407 ile sıcaklık verilerinin elde edilmesi için oluşturulan MATLAB/Simulink modeli	51
Şekil 19. Bit Sıcaklık bloğunun iç yapısı	52
Şekil 20. Algılayıcı direncinin hesaplanması	52
Şekil 21. Algılayıcı direnci kullanılarak sıcaklığın hesaplanması.....	53
Şekil 22. Mikrodnetleyici ile bilgisayar arasındaki veri transferi için oluşturulan MATLAB/Simulink modeli	53
Şekil 23. Fanlı ısıtıcı (a) fanlı ısıtıcı ve montaj aparatı (b) montaj aparatı.....	54
Şekil 24. Montaj aparatının boyutları (a) üstten görünüm (b) yandan görünüm.....	54
Şekil 25. Ölçüm tablasının boyutları	55
Şekil 26. Ölçüm tablasının merkezine yerleştirilmiş fanlı ısıtıcı.....	56

Şekil 27. Sıcaklık ölçüm işleminin akış diyagramı	56
Şekil 28. $z = 10$ cm için ısıtma modelleri (a) yüzey grafiği (b) kontur grafiği.....	57
Şekil 29. Yüzey grafiğinin iki boyutlu görünümü	57
Şekil 30. Eğri uydurma grafikleri (a) genlik sabiti (c) yayılma sabiti	60
Şekil 31. İki ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	65
Şekil 32. İki ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	67
Şekil 33. İki ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	69
Şekil 34. Üç ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	70
Şekil 35. Üç ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	72
Şekil 36. Üç ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü.....	74
Şekil 37. Dört ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	75
Şekil 38. Dört ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	77
Şekil 39. Dört ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	79
Şekil 40. Beş ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü.....	80
Şekil 41. Beş ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	82
Şekil 42. Beş ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	84
Şekil 43. Altı ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	85
Şekil 44. Altı ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü.....	87
Şekil 45. Altı ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü	89
Şekil 46. İki ısıtıcılı birinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları	93
Şekil 47. İki ısıtıcılı birinci dizi için yakınsama grafikleri	94
Şekil 48. İki ısıtıcılı ikinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları	96
Şekil 49. İki ısıtıcılı ikinci dizi için yakınsama grafikleri	96
Şekil 50. Üç ısıtıcılı birinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları.....	98
Şekil 51. Üç ısıtıcılı birinci dizi için yakınsama grafikleri.....	99
Şekil 52. Üç ısıtıcılı ikinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları	101
Şekil 53. Üç ısıtıcılı ikinci dizi için yakınsama grafikleri	101
Şekil 54. Dört ısıtıcılı birinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları	104
Şekil 55. Dört ısıtıcılı birinci dizi için yakınsama grafikleri	104
Şekil 56. Dört ısıtıcılı ikinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları	106
Şekil 57. Dört ısıtıcılı ikinci dizi için yakınsama grafikleri	107
Şekil 58. Beş ısıtıcılı birinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları	109
Şekil 59. Beş ısıtıcılı birinci dizi için yakınsama grafikleri	110

Şekil 60. Beş ısıtıcılı ikinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları.....	112
Şekil 61. Beş ısıtıcılı ikinci dizi için yakınsama grafikleri.....	112
Şekil 62. Altı ısıtıcılı birinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları	114
Şekil 63. Altı ısıtıcılı birinci dizi için yakınsama grafikleri	115
Şekil 64. Altı ısıtıcılı ikinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları	117
Şekil 65. Altı ısıtıcılı ikinci dizi için yakınsama grafikleri	117



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Anahtarlama durumlarına göre algılayıcı kartlarından alınan veriler	46
Tablo 2. Eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen a ve c sabitleri	58
Tablo 3. Dört parametrelili lojistik fonksiyonunun a sabiti için elde edilen katsayıları	59
Tablo 4. Dört parametrelili lojistik fonksiyonunun c sabiti için elde edilen katsayıları	59
Tablo 5. Ölçüm sonuçları ile matematiksel modelin kıyaslanması	61
Tablo 6. İki ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm ve model sonuçları	66
Tablo 7. İki ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm ve model sonuçları	68
Tablo 8. İki ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm ve model sonuçları	69
Tablo 9. Üç ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm ve model sonuçları	71
Tablo 10. Üç ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm ve model sonuçları	73
Tablo 11. Üç ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm ve model sonuçları	74
Tablo 12. Dört ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm ve model sonuçları	76
Tablo 13. Dört ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm ve model sonuçları	78
Tablo 14. Dört ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm ve model sonuçları	79
Tablo 15. Beş ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm ve model sonuçları	81
Tablo 16. Beş ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm ve model sonuçları	83
Tablo 17. Beş ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm ve model sonuçları	84
Tablo 18. Altı ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm ve model sonuçları	86
Tablo 19. Altı ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm ve model sonuçları	88
Tablo 20. Altı ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm ve model sonuçları	90
Tablo 21. Uyarlanabilir ısıtma modeli için optimizasyon senaryoları	91
Tablo 22. Algoritmalar için belirlenen parametre değerleri	91
Tablo 23. İki ısıtıcılı birinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri	92
Tablo 24. İki ısıtıcılı birinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları	93
Tablo 25. İki ısıtıcılı ikinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri	95
Tablo 26. İki ısıtıcılı ikinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları	95
Tablo 27. Üç ısıtıcılı birinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri	97
Tablo 28. Üç ısıtıcılı birinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları	98

Tablo 29. Üç ısıtıcılı ikinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri.....	100
Tablo 30. Üç ısıtıcılı ikinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları.....	100
Tablo 31. Dört ısıtıcılı birinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri.....	102
Tablo 32. Dört ısıtıcılı birinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları.....	103
Tablo 33. Dört ısıtıcılı ikinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri.....	105
Tablo 34. Dört ısıtıcılı ikinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları.....	106
Tablo 35. Beş ısıtıcılı birinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri.....	108
Tablo 36. Beş ısıtıcılı birinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları.....	109
Tablo 37. Beş ısıtıcılı ikinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri.....	111
Tablo 38. Beş ısıtıcılı ikinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları.....	111
Tablo 39. Altı ısıtıcılı birinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri.....	113
Tablo 40. Altı ısıtıcılı birinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları.....	114
Tablo 41. Altı ısıtıcılı ikinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri.....	116
Tablo 42. Altı ısıtıcılı ikinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları.....	116
Tablo 43. Optimizasyon sonuçlarının kıyaslanması.....	118
Ek Tablo 1. İki ısıtıcılı dizi sonuçları.....	130
Ek Tablo 2. Üç ısıtıcılı dizi sonuçları.....	134
Ek Tablo 3. Dört ısıtıcılı dizi sonuçları.....	138
Ek Tablo 4. Beş ısıtıcılı dizi sonuçları.....	142
Ek Tablo 5. Altı ısıtıcılı dizi sonuçları.....	146

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Santigrat derece
A	: Amper
ADC	: Analog sayısal dönüştürücü
CAN	: Kontrolör alan ağı
cm	: Santimetre
CMOS	: Tamamlayıcı metal oksit yarıiletken
CPU	: Merkezi işlem birimi
DC	: Doğru akım
$\Delta(T)$	: Sıcaklık değişimi
$\Delta(V_c)$	: Çıkış gerilimi değişimi
FBG	: Fiber bragg ızgara
GEK	: Geri elektromotor kuvveti
GHİ	: Güç hattı iletişimi
GND	: Toprak
Hz	: Hertz
I2C	: Entegreler arası bağlantı
I_{A_maks}	: Algılayıcı maksimum akımı
I_A	: Algılayıcı akımı
kB	: Kilobayt
k Ω	: Kiloohm
LED	: Işık yayan diyot
mA	: Miliamper
MAE	: Ortalama mutlak hata
MB	: Megabayt
μ F	: Mikro Farad
MHz	: Mega Hertz
MKA	: Manyetik kaldırılmalı araç
mm	: Milimetre
MSE	: Ortalama karesel hata

MSO	: Mayıs sineği optimizasyonu
mV	: Mili Volt
NEBH	: Negatif en büyük hata
NTC	: Negatif sıcaklık katsayısı
OA	: Optimizasyon algoritması
Ω	: Ohm
PCB	: Baskı devre kartı
PEBH	: Pozitif en büyük hata
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
PTC	: Pozitif sıcaklık katsayısı
PV	: Fotovoltaik
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
R^2	: R kare
R_A	: Algılayıcı direnci
R_{A_maks}	: Maksimum algılayıcı direnci
R_{A_min}	: Minimum algılayıcı direnci
RAM	: Rastgele erişimli bellek
RF	: Radyo frekansı
RFBG	: Yenilenmiş fiber bragg ızgara
R_G	: Kazanç direnci
RHO	: Radyal hareket optimizasyonu
RMSE	: Kök ortalama karesel hata
RPR	: Mesafe-nokta-mesafe
RRR	: Mesafe-mesafe-mesafe
SDIO	: Güvenli dijital giriş çıkış
SPI	: Seri paralel arayüz
SSE	: Hata kareleri toplamı
SST	: Karelerin toplamı
T	: Sıcaklık
USART	: Evrensel senkron asenkron alıcı verici
V	: Gerilim
V_A	: Algılayıcı gerilimi

V_{A_maks}	: Maksimum algılayıcı gerilimi
V_{A_min}	: Minimum algılayıcı gerilimi
V_{ADC}	: Analog sayısal dönüştürücü gerilimi
V_{bit}	: Bit gerilimi
V_{CC}	: Besleme gerilimi
$V_{\text{Ç}}$	: Çıkış gerilimi
V_G	: Giriş gerilimi
V_{G_maks}	: Maksimum giriş gerilimi
V_{G_min}	: Minimum giriş gerilimi
VOx	: Vanadyum oksit
VPS	: Buhar fazlı lehimleme

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Elektrikli ısıtıcılar, günlük hayatta, endüstriyel uygulamalarda ve sağlık sektöründe olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ev, ofis ve iş yerlerinde merkezi ısıtma sistemlerinin yetersiz kaldığı veya ilave ısıtma için kullanılırken, endüstride gıda işleme, ekipmanları donmaya karşı koruma, uygun ortam sıcaklığını ayarlama ve ürünlerinin sıcaklık dayanımını test etme gibi uygulamalarda elektrikli ısıtıcılardan faydalanılmaktadır (Jan vd., 2021; Yang vd., 2024). Sağlık alanında ise kızılötesi ısıtıcıların fizyoterapi ve rehabilitasyon merkezlerinde kas ağrılarını azaltma ve eklem rahatsızlıklarını gidermede kullanımı yaygındır (Ramirez vd., 2022). Kullanım amaçlarına göre ısıtıcılar, fanlı, seramik, kızılötesi, konvektör ısıtıcılar ve yağlı radyatörler olarak sınıflandırılabilirler.

Fanlı ısıtıcılar genellikle içerisinde elektrik enerjisi ile ısıtılan bir rezistans ve oluşan ısıyı ortama yaymaya yarayan bir fanla oluşmaktadır. Bazı modellerinde rezistans yerine ısıtımın daha dengeli yayılmasını sağlamak için seramik malzeme de kullanılmaktadır. Ergonomik yapıları sayesinde küçük alanların hızlı bir şekilde ısıtılması için tercih edilen bir ısıtıcı türüdür. Maliyetlerinin düşük olması, taşınabilir olmaları ve fan hızı ile ısı seviyesinin ayarlanabilir olması diğer avantajlarından. Gürültülü çalışması, ortamdaki havayı kurutması ve geniş alanlar için yetersiz kalması dezavantajları olarak sayılabilir.

Seramik ısıtıcılar adından da anlaşılacağı üzere seramik plakalar yardımıyla ısı yayan elektrikli ısıtıcı türüdür. Seramik malzemenin ısıyı depolama ve yayma özelliği bu ısıtıcı türünü enerji verimliliği ve güvenlik açısından ön plana çıkarmaktadır. Seramik ısıtıcıların öne çıkan özellikleri sessiz olması, ısıyı dengeli ve hızlı bir şekilde yaymaları ve diğer ısıtıcılara kıyasla seramik malzemeden ötürü yanma riskinin daha az olmasıdır. Öte yandan sınırlı ısıtma kapasitelerinden dolayı büyük odalarda veya açık alanlarda kullanımı yaygın değildir.

Kızılötesi ısıtıcılar elektrik enerjisini kızılötesi ışığa dönüştürerek ısıtma yapan ısıtıcı türüdür. Diğer ısıtıcı türlerinden farklı olarak havayı değil direkt karşısındaki canlıyı, nesneyi veya yüzeyi ısıtırlar. Bu ısıtıcıların yaydığı ışınlar tıpkı güneş gibi havadan geçerek ulaştığı yüzey üzerinde ısı üretir. En yaygın olarak kullanılan türü kızılötesi ışın yayan rezistanslı modeldir. Bu ısıtıcı türünde ısı, ışıma yoluyla yayıldığı için bekleme olmadan

anında ısınma sağlanır. Havanın ısıtılmasına gerek olmadığı için dış ortamlarda kullanıma oldukça uygundurlar. Isının ihtiyaç duyulan bölgeye verilmesi ve ısıtmanın hemen gerçekleşmesi enerji verimliliği açısından bu ısıtıcıları oldukça avantajlı konuma getirmektedir. Aynı zamanda fana ihtiyaç duymadıklarından dolayı oldukça sessiz çalışırlar. Bunun yanında doğrudan ısıtma yaptıkları için yönlendirme gerekliliği, ışınların ulaşmadığı yüzeylerin yeterince ısınmaması ve geniş alanların ısıtılmasında ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olması bu ısıtıcı türünün dezavantajlarıdır.

Elektrikli ısıtıcı seçiminde kullanım amacına göre enerji verimliliği, ısıtma kapasitesi, kullanım kolaylığı, güvenlik özellikleri, fiyat kalite dengesi, gürültü seviyesi, garanti süresi ve servis hizmetleri gibi faktörler göz önünde bulundurulmaktadır. Bu bilgiler üreticilerin çoğunluğu tarafından müşterilere katalog bilgisi olarak verilmekle birlikte yeterli değildir. Mevcut durumda ısıtma modeli bilgisi üreticiler tarafından sunulmamaktadır. Isıtıcı seçiminde ısıtıcıların ortama yaydığı ısı dağılımını gösteren ısıtma modellerinin bilinmesi de kritik bir öneme sahiptir. Isıtma modeli, ısıtıcının tasarımı, teknolojisi ve çevresel koşullara bağlıdır. Modelin bilinmesi kullanılacak yere ve kullanım amacına göre doğru ısıtıcının seçimine fayda sağlayacağından konfora ve enerji verimliliğine olumlu etki edecektir. Isıtma sistemlerinin çalışmasını optimize etmenin önemi göz önüne alındığında, performans analizi yapabilmesi için ısıtıcıların ısıtma modellerinin elde edilmesi gerekmektedir. Böylece gereksiz ısıtma ve soğutmanın önüne geçilerek uygun maliyetli ve yüksek performanslı ısıtma yapabilmenin önü açılacaktır.

1.2. Literatür Araştırması

Isıtma modelleri çıkarmaya yönelik yapılan sıcaklık ölçümü ile ilgili çalışmalar literatürde geniş bir alanı kapsamaktadır. Bu çalışmaların temel yapı taşını sıcaklık algılayıcıları oluşturmaktadır. Sıcaklığın izlenmesi, kontrol edilmesi ve düzenlenmesi amacıyla kullanılan sıcaklık algılayıcılar birçok alanda kalite, güvenlik ve verimlilik için oldukça önemli role sahiptir.

Günümüzde sıcaklık ölçümüne gıda üretimi ve otomotiv ekipmanlarının tasarımı gibi endüstriyel uygulamalarda, elektronik cihazlar, motorlar ve transformatörler gibi bileşenlerin çalışma verimliliği ve güvenliği hususunda elektronik ve enerji alanında, vücut sıcaklığının izlenmesi için sağlık sektöründe, sıcaklık değişimlerinin materyallerin özellikleri ve tepkimeler üzerindeki etkilerini anlamak için fizik ve malzeme bilimi

alanlarında olmak üzere birçok alanda ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanlarda sıcaklığın doğru ölçülmesi süreçlerin doğru yürütülmesi, güvenlik ve verimlilik açısından büyük önem arz etmektedir. İlaç endüstrisi, yarı iletken malzeme üretim süreci, nükleer enerji santrallerinin işletilmesi vb. alanlarda ise hassas sıcaklık ölçümü gerektiren uygulamalar bulunmaktadır. Bu alanlarda sıcaklık değişimlerini uzamsal olarak milimetre hatta mikrometre seviyelerinde izlemek veya kontrol etmek gerekir.

Sıcaklık ölçümü için piyasada termokupllar, termistörler, direnç sıcaklık detektörleri, fiber optik algılayıcılar ve kızılötesi termal kameralar olmak üzere birçok farklı algılayıcı türü kullanılmaktadır. Bunlardan termokupl farklı metallerin birleştirilmesi ile oluşturulan termoelektrik bir algılayıcıdır (Bajzek, 2005; Frost vd., 2021; Mallick vd., (2024). İki metalin temas ettiği yerde oluşan termoelektrik etki ile sıcaklık değişiminin ölçülmesini sağlar. Termistörler ise dirençleri sıcaklıkla değişen termal duyarlı malzemelerden üretilir (Santos & Santos, 2022). Negatif sıcaklık katsayılı (NTC) veya pozitif sıcaklık katsayılı (PTC) olmak üzere üretilirler (Liu vd., 2024; Zhang vd. 2023). Termal kameralar objelerin yüzeyinden yayılan kızılötesi ışımayı ölçerek sıcaklığı belirler. Genelde temassız ve uzaktan ölçümler için tercih edilmektedir (Aryal & Gerber, 2019; Bloch vd., 2020). Fiber optik sıcaklık algılayıcıları, sıcaklık değişimlerini algılamak için fiber optik kabloların özelliklerinden yararlanır. Bu sistemler, özellikle endüstriyel uygulamalarda, zor ortam koşullarında ve yüksek hassasiyet gerektiren durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang vd., 2021; Liu vd., 2024). Direnç-sıcaklık algılayıcıları ise adından da anlaşılacağı üzere platin, nikel, demir gibi metallerin direncinin sıcaklıkla değişimini kullanarak sıcaklık ölçümünü gerçekleştirir (Neji vd., 2021; Sarkar, 2018; Turkani vd., 2019). En yaygın kullanılanları platinden yapılan PT100, PT500 ve PT1000 sıcaklık algılayıcılarıdır.

Literatürdeki çalışmalar dört başlık altında toplanmıştır. Bunlar:

1. Endüstriyel Uygulamalar
2. Sıcaklık Ölçüm Sistemleri
3. Mikrodalga Isıtma
4. Yenilikçi Ölçüm Teknolojileri

1.2.1. Endüstriyel Uygulamalar

Bu başlık altında malzemelerin ısı davranışlarının sanayiye yönelik uygulamalardaki etkilerini ele alan çalışmalar incelenmiştir. Süper iletkenlik, sıcaklık profilleri ve sıcaklık

izleme ile ilgili konularda literatürde yer alan çalışmalar detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu uygulamalarda optimizasyon ve verimlilik artırıcı yöntemler öne çıkmaktadır.

(Pan vd., 2024) kaya gazının çıkarılmasında azot ısıtma teknolojisinin sıcaklık alanı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında sayısal simülasyonlar kullanılarak, azot enjeksiyon hızı, enjeksiyon ve üretim oranı, çatlak katmanlarının sayısı ve mesafesi gibi parametrelerin sıcaklık alanı dağılımını nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre kaya gazı rezervuarında sıcaklık alanı dağılımının hızlı başlangıç, istikrarlı artış ve stabil durum olmak üzere üç aşamada geliştiği görülmüştür. Enjeksiyon hızının ve çatlak katman sayısının sıcaklık alanının genişliği ve homojenliğini doğrudan etkilediği, katmanların uygun mesafede yerleştirilmesi ve dengeli kuyulama modeli ile sıcaklık alanı optimize edilerek kaya gazı üretim verimliliğinin artırılacağı kanıtlanmıştır.

(Kamarudin vd., 2024) YEr-123 sisteminde yüksek süper iletkenlik performansı elde etmek için optimum ısıtma desenini ve büyüme koşullarını belirlemek amacıyla ısıtma desenlerinin optimizasyonunu konu alan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, ısıtma desenlerinin süper iletkenlerin mikroyapısı ve performansı üzerinde doğrudan etkiye sahip olduğu, optimum sıcaklık ve homojen faz dağılımında parçacıklar arasında daha iyi bir bağlanma sağlayarak süper iletkenlik performansının artırdığı görülmüştür. Aynı zamanda yavaş soğutmanın ısıtma desenlerini daha da iyileştirerek daha büyük tek parça yapıların oluşumunu mümkün kıldığı çalışmada belirtilmiştir.

(Sagita vd., 2022) yaptıkları çalışmada, kahve fermantasyonunda omik ısıtma sistemlerinin ısıtma desenleri, enerji gereksinimleri ve elektriksel iletkenlik üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışmada, farklı voltaj gradyanları ve işlem kapasitesi seviyeleri kullanılarak kahve çekirdeklerinin sıcaklık koşullandırma süreci analiz edilmiştir. Omik ısıtmanın, kahve çekirdeklerinde içten dışa doğru hacimsel ısıtma sağlayarak homojen bir sıcaklık dağılımı oluşturduğu ve ısıtma desenlerinin, voltaj gradyanı ve kapasiteye bağlı olarak değişiklik gösterdiği sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu bulgular, omik ısıtmanın kahve fermantasyonu gibi süreçlerde sıcaklık koşullandırma için etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Ayrıca ısıtma desenlerinin, fermantasyon sürecinin daha hızlı ve tutarlı olmasını desteklediği sonucuna varılmıştır.

(Hwang, 2023) çalışmasında karbon çeliği ve paslanmaz çelik malzemelerin farklı termal özelliklere bağlı olarak yeniden ısıtma sürecindeki termal davranışlarını karşılaştırmaktadır. İki çelik türü arasındaki temel fark, karbon çeliği faz dönüşümü geçirirken daha yüksek bir termal iletkenliğe sahipken, paslanmaz çeliğin faz dönüşümü

olmadan daha düşük bir termal iletkenliğe sahip olmasıdır. Makale, termal iletkenlik ve faz dönüşümünün ısıtma desenlerini nasıl etkilediğini detaylı bir şekilde açıklamaktadır. Paslanmaz çeliğin düşük termal iletkenliği, başlangıçta daha yüksek sıcaklık farklılıklarına yol açar. Bu nedenle, düşük sıcaklıklı ön ısıtma veya yanmasız bir bölge, sıcaklık dağılımını iyileştirmek için gereklidir. Öte yandan, karbon çeliğinin faz dönüşüm sürecindeki sıcaklık sapmalarını yönetmek için bu süreçteki gaz sıcaklıklarının dikkatlice kontrol edilmesi önerilir. Fırın hem termal stresleri azaltmak hem de sıcaklık dağılımını homojen hale getirmek için farklı ısıtma desenleriyle tasarlanmalıdır.

(Bazzo vd., 2015) hidroelektrik jeneratör statorlarının sıcaklık dağılımını izlemek için Raman dağılımını kullanarak dağıtılmış sıcaklık algılama sistemine dayalı yeni bir termal görüntüleme yöntemini tanıtmışlardır. Bu sistem, jeneratör statorunun üç boyutlu modeliyle birleştirilen sıcaklık ve algılayıcı pozisyon bilgilerini kullanarak termal görüntüler oluşturur. Dağıtılmış sıcaklık algılama sisteminde sıcaklık çözünürlüğü $\pm 0,04$ °C ve uzamsal çözünürlüğü 1 m olan fiber optik algılayıcılar kullanılmıştır. Bu algılayıcılar statorun yüzeyine paralel olarak yerleştirilmiş ve yüzeyin yaklaşık %9'unu kapsayacak şekilde düzenlenmiştir. Sıcaklık verilerinin karşılaştırılması için geleneksel PT100 algılayıcısından faydalanılmıştır. Sistemin temel avantajı, geleneksel lokalize algılayıcıların aksine, tüm stator yüzeyinde sıcaklık farklılıklarını tespit edebilmesidir. Sıcaklık profilleri 10 saniye aralıklarla gerçek zamanlı olarak LabVIEW programında izlenebilmektedir. Çalışma, Salto Osório hidroelektrik santralindeki 200 MW'lık bir jeneratörde yapılan 22 saatlik testlerde yöntemin uygulanabilirliğini ve yüksek doğrulukla çalıştığını göstermiştir. Önerilen bu yöntemin, jeneratörlerin sıcaklık profilini hassas bir şekilde izleyerek bakım maliyetlerini azaltabileceği ve elektrik makinelerinin tasarımını ve performans sınırlarının belirlenmesini destekleyeceği savunulmuştur.

(Reigosa vd., 2016) sabit mıknatıslı senkron makinelerde sabit mıknatısların sıcaklık dağılımını tahmin etmek için geri elektromotor kuvveti (GEK) harmoniklerini kullanarak geliştirilen bir yöntemi tanıtmışlardır. Bu yöntemde geleneksel sıcaklık ölçüm yöntemlerinin aksine sıcaklık dağılımındaki farklılıkların da tespit edilebileceği savunulmuştur. Çalışmada, GEK harmonikleri kullanılarak mıknatısların farklı bölgeleri arasındaki sıcaklık farkları tahmin edilmiştir. Her mıknatısın üzerine, 3×5 düzeninde toplam 15 sıcaklık algılayıcı monte edilmiş ve algılayıcı dizilimi rotorun hem eksenel hem de teğetsel yönlerinde sıcaklık dağılımını ölçmek için optimize edilmiştir. Sıcaklık algılayıcılarından alınan veriler, GEK genlik değişimlerinden hesaplanan verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre

tahmin hatası genellikle 2 °C'nin altında kalmış ve maksimum sıcaklık farkı ise 15 °C olarak ölçülmüştür. Önerilen yöntem hem simülasyon hem de deneysel sonuçlarla doğrulanmış ve miknatis sıcaklık dağılımını tahmin etmede uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

(Lindner vd., 2018) alüminyum döküm sürecinde sıcaklık dağılımını izlemek için yenilenmiş fiber bragg ızgara (RFBG) algılayıcı dizisinin kullanılmasını ele almışlardır. Bu algılayıcılar döküm sırasında sıcaklık profillerini belirlemek, katılaşma cephesinin hareketini takip etmek ve soğuma sürecini analiz etmek için tasarlanmıştır. RFBG algılayıcıları, yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve döküm işlemi sırasında kablo karmaşıklığını en aza indiren tek bir fiber aracılığıyla çok noktalı ölçüm sağlar. Ayrıca referans sıcaklık ölçümleri için de K-tip termokupl kullanılmıştır. Dizi 10 mm aralıklarla yerleştirilmiş dört fiber algılayıcıdan oluşur ve döküm kalıbındaki simetrik iki bölümden birine yerleştirilmiştir. Algılayıcılardan alınan veriler, katılaşma cephesinin hareketini ve sıcaklık profillerini belirlemek için analiz edilmiştir. Önerilen algılayıcı dizisinden elde edilen veriler, termokupllarla yapılan ölçümlerle karşılaştırılmış ve yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmanın döküm işlemlerinin izlenmesinde ve optimize edilmesinde yenilikçi bir yöntem sunduğu, döküm kalitesini artırmak ve proses verimliliğini iyileştirmek için önemli bir araç olduğu değerlendirilmiştir.

1.2.2. Sıcaklık Ölçüm Sistemleri

Bu başlık altında algılayıcı teknolojilerinin gelişimi ve algılayıcıların farklı ölçüm sistemlerine entegrasyonu ile ilgili çalışmalar verilmiştir. Sıcaklık, basınç, nem ve manyetik alan gibi parametrelerin ölçülmesini içeren yenilikçi algılayıcı sistemlerinin endüstriyel, biyolojik, çevresel izleme ve enerji yönetimi gibi geniş uygulama alanlarındaki kullanımları verilmiştir.

(Jain & Grimes, 2001) çalışmalarında, sıcaklık ve basıncı aynı anda ölçmek için kullanılan kablosuz bir magnetoelastik mikro algılayıcı dizisinin geliştirilmesini ve test edilmesini ele almıştır. Çalışmada, dört farklı magnetoelastik algılayıcıdan oluşan bir algılayıcı dizisi, basınç ve sıcaklık ölçümleri için kullanılmıştır. Önerilen sistem, kablosuz ve pasif olması sayesinde, kapalı ve erişilemeyen ortamların (örneğin gıda paketleri, ilaç kutuları, vb.) çevresel parametrelerini izlemek için uygun olduğu ve çok parametreliliği çevresel izleme gerektiren uygulamalar için yenilikçi bir çözüm sunduğu çalışmada vurgulanmıştır.

(Schaufelbühl vd., 2001), düşük maliyetli ve soğutma gerektirmeyen bir termal görüntüleme cihazı geliştirme üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Cihaz, ticari CMOS işlem teknolojisi kullanılarak üretilmiş 10×10 termoelektrik kızılötesi algılayıcı dizisine dayanmaktadır. Dizi mikrodenetleyici ve analog dijital dönüştürücü (ADC) bir devreye entegredir ve düşük gürültülü yükselteç ile sıcaklık bilgileri bilgisayara iletilmektedir. Bu dizinin ölçüm çözünürlüğü 530 mK olarak ölçülmüştür. Önerdikleri sistemin düşük maliyetli, portatif ve enerji verimliliğinin yüksek olması gibi avantajlarından ötürü, varlık algılama, uzaktan sıcaklık ölçümü ve bina kontrolü gibi uygulamalar için kullanılabileceğini savunmuşlardır.

(Nguyen, 2002) çalışmasında rüzgâr hızını ve yönünü ölçmek için hareketli parça gerektirmeyen yeni bir algılayıcı konsepti sunmuştur. Bu ölçüm konsepti, bir ısıtıcı etrafındaki termal görüntüye dayanmaktadır. Buna göre hava akışı, zorlamalı konveksiyon yoluyla bu termal görüntüyü değiştirir ve bu görüntünün analizi rüzgâr hızı ve yönü hakkında bilgi verir. Sistem, bir ısıtıcı ve 5×8 diziliminde 40 adet termokupl sıcaklık algılayıcısından oluşan bir dizi içerir. Diziden elde edilen iki boyutlu termal görüntüden faydalanılarak hız ve yön bilgileri çıkarılır. Ölçüm sisteminin, kompakt yapısıyla düşük bakım maliyetli bir çözüm sunarak, geleneksel rüzgâr algılayıcılarına yenilikçi bir alternatif oluşturduğunu savunulmuştur.

(Nguyen, 2005) hem akış yönünü hem de akış hızını ölçebilen yeni bir termal akış algılayıcı konsepti sunmuştur. Sistem, bir silindirik ısıtıcı ve bu ısıtıcının çevresine yerleştirilmiş termokupl sıcaklık algılayıcılardan oluşur. Algılayıcılar 6 cm çapında bir alüminyum disk üzerindeki 5 eş merkezli halkaya yerleştirilmiştir. Her halkada 8 adet olmak üzere toplamda 40 adet algılayıcı kullanılmıştır. Isıtıcı, sabit bir sıcaklıkta çalışır ve sıcaklık algılayıcıları, ısıtıcının etrafındaki iki boyutlu sıcaklık dağılımını ölçer. Elde edilen sıcaklık profilinden faydalanılarak Gaussian tabanlı bir tahmin algoritması ile akış yönü, ortalama sıcaklık ve kalorimetrik yöntem kullanılarak da akış hızı ölçümünün yapılabildiği görülmüştür.

(Ivanov vd., 2006) çalışmalarında, diferansiyel düşük uyumlu interferometri yöntemi kullanılarak çok kanallı sıcaklık algılamayı ele almışlardır. Çalışmada, dört adet ekstrinsik Fabry-Pérot sıcaklık algılayıcısından oluşan bir zincir ile yapılan sıcaklık ölçümleri gösterilmiştir. Bu algılayıcılar, $0,005 \text{ }^{\circ}\text{C}$ düşük gürültü seviyesinde $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar olan sıcaklıklarda yüksek hassasiyetle çalışmaktadır. Gerçekleştirilen sistem yüksek sıcaklıklarda

endüstriyel ölçüm uygulamaları için uygun, düşük maliyetli ve gürültüye dayanıklı bir sıcaklık ölçüm çözümü sunmuştur.

(Tao & Mu, 2009) çok noktalı fiber bragg ızgara (FBG) algılayıcılarına dayalı bir sıcaklık ölçüm sisteminin baraj sızıntı izleme uygulamalarındaki kullanımını ele almıştır. Her bir fiberde 20 algılayıcı içeren ve toplamda 32 fiberden oluşan ölçüm sistemi barajın çevresel eklemlerine ve ana güvenlik bölgelerine yerleştirilmiştir. Sistem toprak ısıtıldığında, suyun termal iletkenliği nedeniyle oluşan sıcaklık farkını algılayarak sızıntının yerini belirler ve otomatik izleme sağlar. Algılayıcıların sıcaklık yanıt doğruluğu %99,7 olarak ölçülmüştür ve 0,0091 nm/°C hassasiyetinde sıcaklık değişimlerini algılayabilmektedir. Geleneksel yöntemlere göre FBG algılayıcı sistemi, yıldırım ve çevresel parazitlere karşı daha dayanıklı, daha hassas ve güvenilir bir çözüm sunar.

(Billard vd., 2016) yaptıkları çalışmada, beyin içinde yerel sıcaklık alanlarının ölçümü için tasarlanmış, esnek bir vanadyum oksit (VOx) termistör dizisine dayanan prototip bir nöral probu tanıtmışlardır. Bu prob, beyin sıcaklığını hücre grupları ve kapiler yataklar düzeyinde hassas bir şekilde ölçmek için geliştirilmiştir. Cihaz, termal ve mekanik dayanıklılık bakımından beyin dokusuyla uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. 10 µm × 10 µm boyutlarında 8 termistör içeren diziden oluşan prototip, cam bir substrat üzerinde laboratuvar ortamında test edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre 20–57 °C aralığında doğrusal bir direnç-sıcaklık ilişkisi gözlemlenmiş ve ölçüm hassasiyeti 8 mK olarak hesaplanmıştır. Yüksek sıcaklık duyarlılığı ve çözünürlüğüne sahip bu esnek VOx termistör dizisinin, yerel beyin sıcaklığı ölçümleri için uygun bir çözüm sunarak nörolojik araştırmalarda potansiyel uygulamalar için umut vaat ettiğini öne sürmüşlerdir.

(Panpan vd., 2019) meteorolojik gözlem hizmetlerinde tek kanallı ölçümlerin karşılaştığı sinyal girişimi, kötü hava koşulları ve algılayıcı arızaları problemlerine karşı daha dayanıklı bir çözüm sunmak amacıyla çok kanallı bir sıcaklık ölçüm sistemi geliştirmişlerdir. STM32F411 mikro denetleyiciye dayanan sistemin, 3 adet PT100 sıcaklık algılayıcısından gelen verileri birleştirerek daha yüksek veri bütünlüğü ve doğruluk sağladığını öne sürmüşlerdir. Sistemin çalışması, elde edilen gerçek zamanlı sıcaklık verilerinin filtreden geçirilip birleştirilmesi ve ardından 4G ağı ile bir üst bilgisayara iletilmesi şeklindedir. Yaptıkları testler önerilen sistemin sürekli ve doğru bir şekilde verileri aktardığı ve tek algılayıcılı sistemlere kıyasla veri bütünlüğünü önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Çalışmada önerilen yöntemin meteorolojik gözlem hizmetlerinde sıcaklık

ölçümlerinin güvenilirliğini artırarak pratik uygulamalarda önemli bir avantaj sunduğu belirtilmiştir.

(Chi vd., 2015) hücre bazlı analiz ve ilaç taraması için çok modlu bir CMOS algılayıcı dizisini tanıtmıştır. Bu algılayıcı dizisi, hücre dışı voltaj kaydı, hücresel empedans haritalama, optik gölge görüntüleme ve sıcaklık izleme gibi hücresel fizyolojik tepkileri dört farklı modda gerçek zamanlı olarak izlemek için tasarlanmıştır. Algılayıcı dizisi, her biri bir sıcaklık algılayıcı ve 16 adet üç modlu algılayıcı pikselinden oluşan 9 paralel piksel grubundan meydana gelir. Algılayıcılar, yüksek çözünürlüklü ve gerçek zamanlı ölçüm sağlamak için birbirine paralel olarak yerleştirilmiştir ve bağımsız olarak yapılandırılabilirler için çok modlu ölçüm yapabilirler. Yaptıkları testlerde bu yapının, hücresel yanıtların kapsamlı bir şekilde izlenmesine olanak tanıdığı ve tek bir hücresel numune üzerinde birden fazla fiziksel modu aynı anda ölçebildiğini göstermişlerdir. Önerilen algılayıcı dizisinin, hücresel fizyolojik tepkilerin kapsamlı bir şekilde izlenmesi ve biyolojik araştırmalarda çok yönlü kullanım için güçlü bir platform sunduğunu savunmuşlardır.

(Vincent vd., 2021) çalışmalarında, akıllı hücre izleme sistemi geliştirmek için güç hattı iletişimi (GHİ) tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Sistem, pil hücrelerini bireysel olarak izleyebilen ve merkezi bir batarya yönetim sistemi üzerindeki yükü azaltabilen bir algılayıcı ve iletişim devresini içermektedir. Her bir hücrede sıcaklık, voltaj ve akım gibi verileri ölçmek için yerleşik algılayıcı ve veri toplama devreleri kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümü için her bir hücre içinde 7 termistörden oluşan bir sıcaklık algılayıcı dizisi kullanılmış ve termistörler, hücre çekirdeği boyunca 10 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Bu sayede hücre sıcaklıklarının çekirdek boyunca izlenmesine olanak sağlanmıştır. GHİ ağı sayesinde, bu veriler ek kablo gereksinimi olmaksızın merkezi bir kontrol cihazına iletilmiştir. Önerilen yöntem, elektrikli araçlar ve havacılık endüstrilerindeki batarya paketlerinin daha güvenilir ve verimli bir şekilde izlenmesi için çözüm sunmuştur.

(Zhang vd., 2019) yüksek sıcaklık süper iletkenli manyetik kaldırma araçlarında (MKA) kullanılan sıvı nitrojen seviyesinin dinamik koşullarda izlenmesi için PT100 sıcaklık algılayıcısına dayanan bir yöntem sunmuşlardır. Sıvı nitrojenin sürekli buharlaşması, süper iletkenliğin kaybına yol açabileceği için sıvı nitrojen seviyesinin doğru bir şekilde izlenmesi, aracın güvenli çalışması açısından kritiktir. Çalışmada, statik ve dinamik koşullar altında sıvı nitrojen seviyesini izlemek için içerisinde 5 mm aralıklarla yerleştirilmiş 8 adet PT100 algılayıcı bulunan bir cihaz geliştirilmiştir. Geliştirilen cihazla sıvı nitrojenin buharlaşması

sırasında sıcaklık profilleri ölçülmüş ve sıvı nitrojen seviyesi ile algılayıcı sıcaklıkları arasındaki ilişki matematiksel olarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre önerilen sistemin MKA statik ve dinamik titreşim koşullarında sıvı nitrojen seviyesinin tespit edilmesinde güvenilir ve doğru ölçümler yaptığı görülmüştür.

(Bouderbala vd., 2015) nanometre düzeyinde doğruluk gerektiren kapasitif yer değiştirme problemlerinin kalibrasyonunda termal kaymaların etkisini incelemiştir. Araştırmada, termal etkilerin cihaz performansını nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Bunun için kompakt ve hassas bir prototip geliştirilmiş, prototipte bulunan kapasitif problemlerin dört lazer interferometre ile karşılaştırılmasıyla yerinde kalibrasyonu sağlanmıştır. Çalışmada sıcaklık algılayıcı olarak PT100 kullanılmıştır. 19 algılayıcı mekanik yapı içindeki sıcaklık dağılımını izlemek için, 4 algılayıcı ise çevre sıcaklığını ölçmek için yerleştirilmiştir. Mekanik sistemdeki ısı kaynaklarından yayılan termal genleşme ve sürüklenme etkileri, ısıtıcı teller kullanılarak simüle edilmiştir. Test sonuçları, termal etkilerin dikkatlice kontrol edilmesi durumunda artık hataların genellikle 5 nm'nin altında olduğunu göstermiştir. Ayrıca lazer interferometrelerin açılması sırasında sistemdeki sıcaklık dalgalanmaları metrik çerçevede 10 mK ile sınırlandırılmıştır. Bu çalışma, nanometre düzeyinde hassasiyet gerektiren ölçüm cihazlarının tasarımı ve kalibrasyonunda termal etkilerin nasıl ele alınacağına dair önemli bulgular sunmuştur.

(Ge vd., 2014) sınırlı iç mekanlarda yangın kaynağını tespit etmek için mesafe-mesafe-mesafe (RRR) modeline dayanan yeni bir yangın lokalizasyon yöntemini tanıtmışlardır. Önerdikleri bu yöntem ile geleneksel mesafe-nokta-mesafe (RPR) modelindeki sınırlamaları aşmayı amaçlamışlardır. Çalışmada her biri negatif sıcaklık katsayısına sahip dört adet sıcaklık algılayıcısından oluşan iki algılayıcı dizisi kullanılmıştır. Diziler tavan boyunca yerleştirilmiş ve yangın kaynağından yayılan sıcak hava dalgalarının açısız ölçümlerinden faydalanılarak kaynağın yerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Algılayıcılardan alınan sıcaklık verileri ile istatistiksel ortalama ve varyans hesaplamaları kullanılarak yangın kaynağı tahmin edilmektedir. Önerilen yöntemin, Gaussian ve karışık gürültü koşulları altında yapılan simülasyonlarında mevcut yöntemlerden daha iyi doğruluk ve dayanıklılık gösterdiği kanıtlanmıştır. Sonuç olarak bu yöntemle sınırlı iç mekanlarda yangın tespiti için daha doğru ve hızlı bir çözüm sağlandığı ve yangınla mücadelede önemli bir teknoloji olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

(Oiler vd., 2014) çalışmalarında zorlu çevre koşullarında, özellikle Yellowstone Ulusal Parkı'ndaki sıcak su kaynaklarında yapılan sıcaklık ve elektriksel iletkenlik ölçümleri

için bir algılayıcı dizisinin tasarımını, üretimini ve uygulamasını sunmuşlardır. Çalışma, fotosentetik organizmaların sıcaklık ve kimyasal bileşimdeki keskin değişikliklere yanıt olarak nasıl etkilendiğini anlamaya odaklanmıştır. Dizide 1 cm aralıklarla lineer bir şekilde yerleştirilmiş 15 adet nikel direnç sıcaklık algılayıcısı kullanılmıştır. Diziden elde edilen sıcaklık verileri algılayıcılar arasındaki bölgesel farklılıkları haritalandırmak için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre algılayıcı dizisi birkaç santimetrelik mesafelerde sıcaklık ve iletkenlikteki değişiklikleri yüksek çözünürlükle haritalamış ve fotosentetik mikroorganizma topluluklarının dağılımı, sıcaklık verilerinden türetilen haritalar kullanılarak izlenebilmiştir. Önerilen bu yapı, karmaşık ekosistemlerde fiziksel ve kimyasal özelliklerin haritalanmasında yeni bir standart belirlemiştir. Çalışmadan elde edilen yüksek çözünürlüklü veriler, biyolojik süreçler ile çevresel parametreler arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamayı mümkün kılmıştır.

(Zacepins & Meitalovs, 2014) arı kolonilerinin çevrimiçi izlenmesi için çok düğümlü bir sıcaklık ölçüm sistemi geliştirilmesini ele almıştır. Çalışmalarında, arı kolonilerinin sıcaklık durumunu sürekli ve gerçek zamanlı olarak izleyerek koloni kayıplarını önlemeyi ve verimliliği artırmayı amaçlamışlardır. Geliştirilen sistem, arı kovanlarının sıcaklık ölçümlerini toplayan uzaktan ölçüm düğümleri ve bu verileri kullanıcıya görselleştiren bir ağ tabanlı sunucu olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Çalışmada geniş bir sıcaklık aralığında ve $\pm 0,5$ °C hassasiyetinde çalışan DS18S20 sıcaklık algılayıcılar kullanılmıştır. Buna göre her düğümde 20 sıcaklık algılayıcısı bulunur. Sistem, bir kışlama binasında ve bireysel bir arıcının dış mekandaki 10 arı kolonisinde uygulanmıştır. Bir düğüm, kovan sıcaklığını izlerken bir diğer düğüm ortam sıcaklığı ve nemi ölçmek için kullanılmıştır. Önerdikleri sistemin, düşük maliyetli olduğu ve arı kolonilerinin durumunu sürekli olarak izleyerek koloni sağlığının takibini kolaylaştırdığı savunulmuştur.

(Morana vd., 2016) sıfır güç araştırma reaktörlerinde çevrimiçi sıcaklık ölçümleri için FBG tabanlı bir sistemin geliştirilmesini ele almışlardır. FBG algılayıcıları, nükleer ortamda sıcaklık ölçümleri için test edilmiş ve geleneksel PT100 sıcaklık algılayıcıları ile karşılaştırılmıştır. Beş FBG aynı fiber boyunca 20 mm aralıklarla alüminyum tüpler içerisine yerleştirilmiştir. FBG'lerin doğruluğunu teyit etmek için ise yedi adet PT100 FBG'lere paralel olarak konumlandırılmıştır. Testler, yüksek hızlı nötron akısı ve gamma ışınları etkisi altında FBG performansını değerlendirmiştir. FBG'lerin, gama-nötron karışık radyasyon ortamlarında bile güvenilir sıcaklık ölçümleri sağladığı ve radyasyondan kaynaklanan kaymaların genelde 2 °C'nin altında olduğu tespit edilmiştir. Önerdikleri yöntemin, nükleer

reaktörlerde sıcaklık ölçümlerinin hassasiyetini artırarak, deneysel belirsizlikleri azaltmada önemli bir katkı sağlayacağını savunmuşlardır.

1.2.3. Mikrodalga Isıtma

Bu başlık altında verilen çalışmalar mikrodalga ve radyo frekans teknolojilerinin farklı uygulamalarını içermektedir. Literatürde yer alan çalışmalar, malzeme işleme, gıda ısıtma, plastik atık dönüşümü gibi alanlarda bu teknolojilerin etkilerini araştırmıştır. Mikrodalga jeneratörleri ve frekans kaydırma stratejileri gibi yenilikçi yöntemlerle enerji verimliliği ve ısıtma homojenliği konuları ele alınmıştır.

(Bhattacharya & Basak, 2023) yaptıkları çalışmada mikrodalga destekli malzeme işleme sırasında kullanılan akrilik ve cam kapların, düşük kayıplı yalıtkan malzemelerin ısıtma desenleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılan bu çalışmada, kap malzemesinin kalınlığı ve türü değiştirildiğinde mikrodalga ısıtma özellikleri (güç dağılımı, sıcaklık desenleri, vb.) nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre akrilik kapların malzeme üzerinde önemli bir etkisi bulunmazken, cam kapların, kalınlığa bağlı olarak ısıtma desenlerini değiştirebildiği ve ısı dağılımının homojenliğini büyük ölçüde değiştirebildiği sonucuna varmışlardır. Çalışmada, kap malzemesi ile mikrodalga arasındaki etkileşimlerin ısıtma desenlerini nasıl şekillendirdiğini ayrıntılı olarak matematiksel modellemeler ve simülasyonlar ile açıklanmaktadır.

(Liu vd., 2023) siyah biber tanelerinin radyo frekans (RF) ısıtmasındaki dizilimlerinin ısıtma deseni üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmalarında, farklı dizilişler (basit kübik, gövde merkezli kübik, rombohedral ve yüzey merkezli kübik) için modelleme yaparak bu dizilimlerin ısıtma oranı ile sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre dört farklı dizilimde de taneler arasındaki boşluk arttıkça hedef sıcaklığa çıkma süresinin uzadığı ve sıcaklık dağılımındaki homojenliğin azaldığı görülmüştür. Yine elde ettikleri desenlerden temas noktası fazla olan modellerin, temas noktalarında aşırı ısınma gözlemlenmiştir. Rombohedral modelin, daha az boşluklu yapısı ile sıcaklık dağılımını homojenleştiren optimum bir çözüm sunduğu kanısına varmışlardır.

(Zhang vd., 2024) plastik atıkların mikrodalga ısıtma yoluyla sürdürülebilir bir şekilde hidrojen üretimine dönüştürülmesini ele alan hacimsel ve yerel ısıtma desenlerini incelemişlerdir. Çalışmada bu ısıtma desenlerinin plastik atıkların dönüşümü üzerindeki etkileri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara

göre hacimsel ısıtma, enerjiyi verimli bir şekilde ısının parçacıklara dağıtılmasını sağlarken, yerel ısıtma daha yüksek sıcaklıkta reaksiyonların gerçekleşmesini desteklediği görülmüştür. Çalışmada bu kombinasyonun, plastiklerin sürdürülebilir ve verimli bir şekilde hidrojen ve karbon gibi değerli ürünlere dönüştürülmesine fayda sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

(Zhou vd., 2023) katı hâl mikrodalga jeneratörlerinin ısıtma desenleri, enerji soğurma verimliliği ve homojenliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada geleneksel magnetron jeneratörlerin geniş ve rastgele frekans spektrumuna sahip olduğu ve bu durumun gıda ısıtma desenlerinin tahmin edilmesini zorlaştırdığı, katı hâl jeneratörlerinin ise, dar frekans bant genişliği ile daha kararlı ve tahmin edilebilir ısıtma desenleri sağladığı vurgulanmıştır. Bunun gıda güvenliği ve işlenmiş gıdaların mikrobiyal kontrolü için önemli olduğu belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca, frekans seçiminin ısıtma desenleri üzerindeki etkileri, deneysel ve simülasyon teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Belirli tamamlayıcı frekansların kullanımının enerji soğurma verimliliğini artırarak ısıtma homojenliğini iyileştirdiği açıklanmıştır.

(Kalinke vd., 2023) gerçekleştirdikleri çalışmada, katı hâl mikrodalga sistemlerinde frekans kaydırma stratejilerinin enerji verimliliği ve ısıtma desenleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Mikrodalga ısıtmanın temel zorluğu olan sıcaklık dağılımındaki homojen olmayan desenleri azaltmayı hedefleyen stratejiler geliştirilmiş ve farklı frekans ayarlarının hem enerji verimliliği hem de ısıtma homojenliğini artırma potansiyelini araştırmışlardır. Çalışmada ısıtma desenleri, kullanılan frekansların ve enerji stratejilerinin dikkatli seçimiyle optimize edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlar adaptif rezonans frekans stratejisi ile hem enerji verimliliği hem de ısıtma homojenliğini artırmanın mümkün olduğunu göstermiştir.

(Zhou vd., 2023), RF ısıtmanın, rastgele istiflenmiş ceviz içleri üzerinde farklı parça boyutlarına bağlı olarak ısıtma desenleri ve homojenliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, üç boyutlu tarama ve bilgisayar destekli modelleme teknikleri kullanılarak cevizlerin ısıtma desenleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ısıtma desenleri, ceviz içlerinin boyutuna, yoğunluğuna ve konteyner içindeki yerleşimine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Çeyrek boyutlu ceviz içleri, daha iyi ısıtma homojenliği sağlamış, ancak daha fazla enerji tüketmiştir. Ayrıca elektromanyetik alan yoğunluğunun yüksek olduğu köşe ve temas bölgelerinde aşırı ısınma meydana gelmiştir. Daha dar elektrot aralığı, ısıtma hızını artırmış ancak homojenliği azaltmıştır. Çalışma, gıda ürünlerinde RF ısıtma

homojenliğini iyileştirmek için simülasyon tabanlı yaklaşımların etkinliğini ortaya koymuş ve büyük ölçekli uygulamalar için yararlı bilgiler sunmuştur.

(Siguemoto vd., 2021) çalışmalarında katı yiyeceklerde mikrodalga ısıtmanın en önemli sorunlarından biri olan homojen olmayan sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Çalışmada iki farklı mikrodalga cihazı (dikdörtgen ve silindirik boşluklar) kullanılarak karidesler ısıtılmış ve üç boyutlu bir modelle simülasyon yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre dikdörtgen boşluklu cihazlar, silindirik boşluklu cihazlara kıyasla daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır. Aynı zamanda karidesin karmaşık şeklinin ve boyutunun, mikrodalga ısıtma sırasındaki sıcaklık dağılımını etkilediği gözlemlenmiştir. Çalışma mikrodalga ısıtmanın yiyeceğin geometrisine ve mikrodalga cihazının tasarımına duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu bilgiler endüstriyel gıda işleme sırasında daha eşit ısıtma sağlamak için cihazların tasarımını optimize etmede kullanılabilir.

(Wilcox vd., 2024) çalışmalarında mikrodalga ısıtmanın homojen olmayan ısıtma desenlerini iyileştirmeye yönelik bir yöntem sunmaktadır. Buna göre çalışmada frekans bölmeli çoklama ve rastgele fazlama olmak üzere iki yeni yöntem önermişlerdir. Frekans bölmeli çoklama yöntemi ile farklı anten elemanlarının farklı frekanslarda çalışması sağlanarak girişim azaltılmış ve daha homojen bir ısıtma deseni elde edilmiştir. Rastgele fazlama yönteminde ise antenlerin fazları rastgele değiştirildiğinde, daha geniş alanlarda homojen bir ısıtma sağlanmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen sistemlerin tek bir anten kullanımına kıyasla ısıtma desenlerinde önemli iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Özellikle, dört elementli bir anten dizisi, tek bir antene göre yaklaşık 5,5 kat daha geniş bir homojen ısıtma alanı sunmuştur.

1.2.4. Yenilikçi Ölçüm Teknolojileri

Bu başlık altında özel kullanım alanları için geliştirilmiş ölçüm teknolojileri ve yenilikçi çözümler ele alınmıştır. Ultrason sistemleri, mikroişlemci sıcaklık haritaları, fotovoltaiik dizilerde sıcaklık dağılımı ve elektronik cihazların termal yönetimi gibi konularda literatürde yer alan çalışmalar verilmiştir. Burada verilen çalışmalarda fiziksel süreçlerin modellenmesi ve yeni ölçüm yöntemleri tanıtılmıştır.

(Hariharan vd., 2014) odaklanmış ultrason uygulamalarında odak noktalarının doku fantomu içinde yerini belirlemek için uzak termokupl dizileri kullanarak geliştirilmiş bir yöntemi tanıtılmışlardır. Bu yöntem, ultrason ışını nedeniyle oluşan sıcaklık artışını

termokupllardan alınan verilerle ilişkilendirerek ışının konumunu yüksek hassasiyetle belirlemeyi esas almaktadır. Dört katmandan oluşan algılayıcı yapısında her katmanda 2 adet olmak üzere toplamda 8 adet termokupl ultrason ışınına doğrudan maruz bırakılmadan sıcaklık değişimlerini ölçmek üzere yerleştirilmiştir. Bu yöntemde her algılayıcıdan alınan sıcaklık verileri, bir ters ısı transfer algoritması ile ışın konumunu optimize ederek tahminler yapar. Sonuçlar, bu yaklaşımın odaklanmış ultrason sistemlerinin hedefleme doğruluğunu artırabileceğini göstermiştir.

(Luria & Shor, 2010) Intel mikroişlemcilerde sıcaklık haritasını çıkarmak için kullanılan minimize edilmiş CMOS termal algılayıcı dizisinin geliştirilmesini ele almıştır. Bu algılayıcı, mikroişlemcilerde meydana gelen sıcaklık değişikliklerini ölçmek ve sıcak nokta izleme sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Mikroişlemci üzerindeki sıcak noktalara yerleştirilen 10 adet algılayıcı bir ızgara şeklinde düzenlenmiştir ve ızgara, mikroişlemcinin farklı bölgelerindeki sıcaklık dağılımını ölçmek için optimize edilmiştir. Yapılan ölçümlerde algılayıcıların doğruluğunun $\pm 0,5$ °C olduğu, düşük güç tüketimi ve yüksek hassasiyetle çalıştığı görülmüştür. Bu algılayıcı dizisinin, mikroişlemcilerde termal izleme ve yönetim için yenilikçi bir çözüm sunduğu ve daha iyi performans sağlamak için gelecek nesil mikroişlemcilerde önemli bir bileşen olacağı savunulmuştur.

(Escribano vd., 2018) Portekiz'deki Amareleja güneş enerjisi santralinde geniş ölçekli bir fotovoltaik (PV) dizisinin sıcaklık dağılımını incelemişlerdir. Bu çalışma, sıcaklık algılayıcılarının türü, sayısı ve yerleşiminin PV modüllerinin sıcaklık ölçümleri üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Çalışmada 135 m² büyüklüğündeki bir PV dizisi üzerinde toplamda dokuz PT100 sıcaklık algılayıcısı kullanılmıştır. Algılayıcılar, bir PV dizisinin yüzeyi boyunca eşit şekilde dağıtılmıştır ve yatay ve dikey sıcaklık farklılıklarını ölçmek için stratejik konumlara yerleştirilmiştir. Algılayıcılardan alınan sıcaklık verileri, yatay ve dikey sıcaklık haritalarını çıkarmak için kullanılmıştır. Gözlemler, düşük rüzgâr hızlarında bile sıcaklık farklarının 10 K'ya kadar çıkabileceğini göstermiştir. Tek algılayıcı ile ölçüm yapıldığında sıcaklık ölçüm belirsizliği ± 4 K'ya çıkarken, sıcaklık algılayıcıları merkezi bir konuma yerleştirildiğinde bu belirsizlik ± 2 K'ya düşmüştür. Elde edilen sonuçlarla sıcaklık dağılımı üzerinde rüzgârın hızı ve yönünün etkisi açık bir şekilde gösterilmiş ve rüzgâr yönüne bağlı sıcaklık haritalarının belirli yönlerde daha belirgin olduğu bulunmuştur. Bu çalışma, geniş PV dizilerinde sıcaklık ölçüm belirsizliğini azaltmanın önemini ve bu belirsizliklerin rüzgâr koşullarına bağlı olarak nasıl değiştiğini ortaya koymuştur. PV

dizilerinde sıcaklık dağılımı çıkarılarak, enerji verimliliğini artırmak ve belirsizlikleri minimize etmenin önemini göstermiştir.

(Aranzabal vd., 2019) kuyu içi ısı değiştiriciler için sıcaklık ölçümleri gerçekleştiren yenilikçi bir cihaz tanıtmışlardır. Bu cihaz, yer altındaki sıcaklık profillerini ayrıntılı bir şekilde ölçerek zemin kaynaklı ısı pompaları için derinliğe bağlı termal iletkenlik tahminlerinde kullanılmak için tasarlanmıştır. Sıcaklık algılayıcısı olarak yüksek hassasiyetli DS18B20 dijital sıcaklık algılayıcısı kullanılmıştır. Algılayıcının çözünürlüğü $\pm 0,06$ °C'dir. Aynı zamanda referans oluşturması amacıyla PT100 algılayıcısı da kullanılmıştır. Gerçekleştirilen ölçüm cihazı boru içinde tek bir sıcaklık algılayıcısını belirli bir hızla yukarı ve aşağı hareket ettirerek ölçümler yapar. Cihazın ölçüm hatası $\pm 0,04$ °C olarak hesaplanmıştır. Test sonuçları, sistemin geleneksel PT100 sıcaklık algılayıcılarıyla karşılaştırıldığında yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağladığını göstermiştir. Kullanım kolaylığı, uzaktan yapılandırılabilir olması benzer yapıdaki akışkan sistemlere entegre edilebilir olması gibi avantajlarından ötürü önerilen cihaz, kuyulu ısı değiştiricilerin termal tasarımını optimize etmek ve enerji verimliliğini artırmak için yenilikçi bir yaklaşım sunmuştur.

(Zbiec & Obrebski, 2014) aerodinamik tünellerde çok noktalı basınç ve sıcaklık ölçümleri yapmak üzere geliştirilmiş bir sistemi tanıtmışlardır. Sistem, ince bir PCB tasarımı, MEMS tabanlı piezorezistif basınç algılayıcıları ve termistörlere dayalı sıcaklık algılayıcıları içermektedir. Sistemde sıcaklık ölçümleri için 12 adet termistör kullanılmıştır. $\pm 0,5$ °C doğrulukla yapılan sıcaklık ölçümleri SPI protokolü kullanılarak RS-485 arabirimi ile LabVIEW yazılımına iletilmektedir. Tünel içindeki hava akışını bozmamak için tasarım, minimum kalınlık ve esneklikte üretilmiştir. Çalışmada ölçüm verilerinin kalibrasyonu için ileri düzey algoritmalar uygulanmıştır. Sistem, aerodinamik tünel testlerinde yüksek hassasiyetle veri toplayabilmekte ve verileri gerçek zamanlı olarak işleyebilmektedir. Bu sistemin, aerodinamik testler için inovatif bir çözüm sunarak, hassas ölçümler ve düşük hata oranları ile yüksek doğruluk sağladığı savunulmuştur.

(Russell vd., 2018) çalışmalarında duyuşal ikame yöntemi kullanarak sıcaklık ve akustik algılayıcılarla duruş tespiti yapmayı ele almıştır. Geleneksel basınç algılayıcıları yerine sıcaklık algılayıcıları ve mikrofonlar kullanılarak oturma durumu, eğilme gibi duruş değişiklikleri tespit edilmiştir. Çalışmada DS18B20 ve Bosch BMP180 sıcaklık algılayıcıları 4×3 matris düzeninde bir sandalye üzerinde dört ana bölgede sıcaklık değişimlerini algılayarak duruş değişimlerini tespit etmektedir. Akustik algılayıcılar ise hareket

esnasındaki sesleri işleyerek duruş değişikliklerini algılar. Yapılan deneysel çalışmalarda sistem sıcaklık değişikliklerini $\pm 0,5$ °C hassasiyetle ölçmüştür. Önerilen yöntemin, oturma duruşu takibi, basınç yaralarını önleme ve güvenlik gibi sağlık ve medikal uygulamalarda yenilikçi bir çözüm sunacağı savunulmuştur.

(Geczy vd., 2011) deneysel buhar fazı lehimleme (VPS) istasyonunun içinde üç boyutlu termal profil oluşturmak için geliştirilen bir ölçüm sistemini tanıtmışlardır. Çalışmada, Galden sıvısı kullanılarak oluşturulan buharın ısı transferi ve dağılımı incelenmiştir. Ölçümler için 3×3 matris şeklinde düzenlenmiş dokuz adet termokupl kullanılmıştır. Farklı dikey yüksekliklerde alınan iki boyutlu sıcaklık verileri birleştirilerek üç boyutlu sıcaklık haritaları elde edilmiştir. Veriler, belirli yüksek sıcaklık süreçlerinde istenilen sıcaklık profillerine ulaşılmasını sağlamak üzere analiz edilmiştir. Bu yöntem, VPS süreçlerinde sıcaklık kontrolünü iyileştirmek ve proses verimliliğini artırmak için önemli bir araç olarak değerlendirilmiştir. Algılayıcı diziliminin özellikle sıcaklık verilerinin doğru bir şekilde haritalanmasını sağlamada etkili olduğu belirtilmiştir.

(Jakovenko vd., 2011) 8W LED lamba için termal simülasyon ve deneysel doğrulama çalışmalarını içeren bir konuyu ele almışlardır. Çalışmanın amacı, LED lambanın termal yönetimini optimize etmek için üç boyutlu termal modeller geliştirmektir. LED lambanın farklı bölümlerindeki sıcaklıkları ölçmek için K-tipi termokupl kullanılmıştır. Sıcaklık dağılımını detaylı bir şekilde ölçmek için algılayıcılar LED kartı, termal koni, muhafaza ve lamba kabuğu üzerine yerleştirilmiştir. Yapılan termal analizde algılayıcılardan alınan ölçümler ANSYS-CFX ve CoventorWare araçlarıyla gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre simülasyon sonuçları ve ölçümlerin %90 uyum gösterdiği belirtilmiştir. Bu çalışmanın, LED lambalarda sıcaklık kontrolünün iyileştirilmesi için yenilikçi simülasyon teknikleri ve deneysel doğrulama yöntemlerini sunması ve gelecekteki termal tasarım süreçlerine rehberlik etmesi öngörülmüştür.

(Liu vd., 2020) çalışmalarında element doping ve enerji spektrumu analizi yöntemlerine dayalı olarak, iki boyutlu alev sıcaklığı ve emisyon dağılımı ölçümüne yönelik yenilikçi bir yöntemi ele almışlardır. Bu yöntem, alev içindeki sıcaklık dağılımını ve emisyon özelliklerini yüksek doğrulukla ölçmeyi amaçlamıştır. Bunun için yüksek hassasiyetli sCMOS monokrom optik kamera kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerin kalibre edilmesi için ise termokupl ve FLIR DL-700 kızılötesi termografi cihazından faydalanılmıştır. Termokupl algılayıcılar alevin dış katmanına, dikey yönde 10 farklı yüksekliğe yerleştirilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre alev sıcaklıkları 1045 K ile 1174 K

arasında ölçülmüş ve kızılötesi termografiyle uyum göstermiştir. Optik sistemle ölçülen emisyon ve sıcaklıklar arasındaki hata oranı ise %5'in altındadır. Sundukları bu yöntemin, yüksek sıcaklık süreçlerinin detaylı analizi ve yanma dinamiklerinin daha iyi anlaşılması için etkili bir yaklaşım olduğunu savunmuşlardır.

(Gaspar vd., 2023) dijital termometreler kullanarak vücut sıcaklığı ölçümüne yönelik bir sistem tasarımını ele almışlardır. Çalışma, DS18B20 dijital sıcaklık algılayıcılarını kullanarak hem sağlık sektöründe hem de diğer alanlarda uygulanabilir, düşük maliyetli ve taşınabilir bir sıcaklık ölçüm sistemi geliştirmeyi hedeflemiştir. Deltoid kasının üç ana bölgesine yerleştirilen algılayıcılar tek bir kablo üzerinden birleştirilerek veri iletimi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sistem izometrik kasılma, ağırlıklı izometrik kasılma ve döngüsel hareketler sırasında deri sıcaklıklarındaki 0,0625 °C'ye kadar küçük değişimleri algılayabilmiştir. Algılayıcıların doğruluğu $\pm 0,5$ °C'dir ve sıcaklık değişimlerinin belirgin olduğu durumlarda hata oranı azalmıştır. Bu sistem, fizyoterapi, spor bilimi ve tıbbi teşhis gibi alanlarda vücut sıcaklığı ölçümü için pratik bir çözüm sunmuştur. Ayrıca düşük maliyetli ve taşınabilir bir seçenek olarak mevcut yöntemlere güçlü bir alternatif oluşturmuştur.

1.3. Tezin Kapsamı ve Amacı

Literatürde bugüne kadar algılayıcı dizileri kullanılarak ısıtma modeli elde edilmesine yönelik yapılan çok sayıda çalışmaya rağmen, iki boyutlu algılayıcı dizisi kullanılarak elektrikli ısıtıcıların üç boyutlu ısıtma modellerini çıkarmaya yönelik bir çalışmanın mevcut olmadığı görülmüştür. Üç boyutlu ölçüm sisteminin gerçekleştirilmesi, donanım karmaşıklığı, veri yönetimi ve yazılım geliştirme gereklilikleri nedeniyle birçok zorluk içermektedir. Algılayıcıların entegrasyonu alan ve enerji yönetimini zorlaştırırken, büyük veri hacimleri ve sinyal gürültüsü gibi sorunlar veri işlemeyi daha karmaşık hale getirmektedir. Tüm bu faktörler, ısıtma modellerinin çıkarılmasını sağlayan üç boyutlu ölçüm sistemlerinin tasarımını ve gerçekleştirilmesini karmaşık bir süreç haline getirmektedir.

Bu tez çalışmasında, elektrikli ısıtıcıların üç boyutlu ısıtma modellerinin elde edilmesi için 81 algılayıcıdan oluşan bir ölçüm sistemi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sisteminde yapılan deneysel çalışmalarda bir fanlı ısıtıcının tabla düzeneği yardımıyla iki boyutlu 9×9 diziliminde sıralanan algılayıcı dizisine doğru dikey hareket ettirilmesi ile ısıtma modelleri

elde edilmiştir. Bu ısıtma modelleri kullanılarak ısıtıcının matematiksel modeli çıkarılmış ve modelin doğruluğu farklı kombinasyonlardaki ısıtıcı dizilerinden alınan ölçümlerle karşılaştırılarak ispatlanmıştır. Daha sonra ölçüm sisteminden bağımsız olarak matematiksel model ve optimizasyon algoritmaları kullanılarak uyarlanabilir ısıtma modelleri oluşturmak için MATLAB programında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar optimizasyon algoritmalarının referans ısıtma modellerini başarılı bir şekilde oluşturabildiğini açıkça ortaya koymuştur. Gerçekleştirilen sistemde sıcaklık algılayıcı olarak yüksek doğruluğu, kararlılığı ve hızlı cevap vermesi gibi avantajlarından ötürü PT100 sıcaklık algılayıcısı tercih edilmiştir. Çalışmada ayrıca, PT100 ile yapılacak sıcaklık ölçümleri için hassasiyeti artırmak amacıyla içerisinde fark yükselteci de bulunan yeni bir algılayıcı devre yapısı önerilmiştir. Önerilen algılayıcı devresi ile yapılacak sıcaklık ölçümüne ilişkin gerekli formüllerin çıkarımı yapılmış ve ölçümün çözünürlük analizi sunulmuştur.

Bu çalışmanın amacı, gerçekleştirilen ölçüm sisteminin elektrikli ısıtıcıların tasarım ve üretim aşamalarında kullanılması ile daha verimli, ekonomik ve ihtiyaç odaklı ısıtıcıların üretilmesine olanak sağlanmasıdır.

1.4. Ara Değer Hesabı

Ara değer hesabı (interpolation) bilinen iki veri noktası arasında kalan değerleri hesaplamak veya tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir (Caruso & Quarta, 1998; Arun, 2013). Eldeki veriler kullanılarak tahmin yapılmasına olanak sağladığı için birçok matematik ve mühendislik alanında sıkça başvurulmuş bir araçtır. Özellikle grafik çizimi ve verilerin görselleştirilmesi, fiziksel sistemlerin modellenmesi, istatistik ve haritacılık gibi çalışma alanlarında kullanımı yaygındır.

Ara değer hesabının amacı bilinen veri noktaları kullanılarak bu noktaların arasında kalan değerleri bulmaktır. Bu işlem yapılırken doğrusal, polinom, spline ve lagrange ara değer hesabı gibi klasik yöntemler kullanılmaktadır. Doğrusal ara değer hesabı, iki veri arasındaki doğrusal ilişkiyi kullanarak tahmin yapar ve bu veriler arasında doğrusal çizgi oluşturmaya dayanır. Polinom ara değer hesabı ise iki veya daha fazla veri arasında daha karmaşık fonksiyonlar kullanarak eğri çizmeye yarar ve doğrusala göre daha hassastır. Çok fazla veri noktası ile işlem yaparken spline ara değer hesabı tercih edilmektedir. Bu yöntemde polinomlar kullanılarak, daha düzgün ve yumuşak eğriler elde edilmesi sağlanır.

Diğer yöntemlerinden farklı olarak lagrange ara değer hesabı yönteminde ise her bir veri noktası için polinom tanımlanır ve bu polinomlar toplandıktan sonra ara değer hesabı yapılır.

Tez çalışmasında ölçülen sıcaklık verilerinin görselleştirilmesinde yukarıda bahsedilen klasik yöntemlerden farklı olarak Makima yöntemi kullanılmıştır.

1.4.1. Makima Ara Değer Hesabı

Makima ara değer hesabı, modifiye edilmiş Akima yönteminin kısaltmasıdır (Akima, 1970; Schreiber vd., 2023). Akima verilerin uç köşelerini ve keskin değişiklikleri önlemek için kullanılırken Makima bunun yanında monotonluğu da muhafaza eder. Yani sürekli artan veya azalan yapıdaki veri setlerinde ara değer hesabı sonucunda bozulma olmaz. Akima algoritması birinci dereceden türev içeren parçalı polinomlar üretmek için kübik ara değer hesabını gerçekleştirir. Algoritmada $[x_i, x_{i+1})$ aralığındaki eğim (m_i), (1) ile hesaplanır.

$$m_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (1)$$

Buna göre x_i noktasındaki türev (d_i) (2) ile tanımlanan yakın noktalarındaki eğimlerin ağırlıklı ortalamasıdır.

$$d_i = \frac{w_1}{w_1 + w_2} m_{i-1} + \frac{w_2}{w_1 + w_2} m_i \quad (2)$$

Burada w_1 ve w_2 ağırlıklı ortalamaları (3) kullanılarak bulunur.

$$\begin{aligned} w_1 &= |m_{i+1} - m_i| \\ w_2 &= |m_{i-1} - m_{i-2}| \end{aligned} \quad (3)$$

Orijinal Akima algoritması ile yapılan ara değer hesabında eğrideki dalgalanmanın her iki tarafına da eşit ağırlık verilir. Makima algoritmasında ise yapılan modifikasyonla birlikte eğimin sıfıra yakın olduğu tarafa daha fazla ağırlık verilmektedir. Bu durum eğride oluşan aşımaların önüne geçilmesine olanak tanır. Makima için ağırlık ortalamaları (4) yardımıyla hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 w_1 &= |m_{i+1} - m_i| + \frac{|m_{i+1} - m_i|}{2} \\
 w_2 &= |m_{i-1} - m_{i-2}| + \frac{|m_{i-1} - m_{i-2}|}{2}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Aşırı dalgalanmaları ve sıçramaları önleyerek daha dengeli ve pürüzsüz eğriler elde edilmesine olanak sağladığından dolayı daha akıcı grafikler elde edilmesinde ve doğal süreçlerin tahmini ve modellenmesinde Makima yöntemi oldukça kullanışlıdır.

1.5. Matematiksel Modelleme

Matematiksel modelleme temel bilimler, mühendislik ve sosyal bilimlerdeki süreçlerin ve olayların anlaşılması, tahmin edilmesi ve kontrol edilmesine yardımcı olması açısından oldukça önemlidir. Doğru model çıkarımı, sistemlerin analizini kolaylaştırarak güvenilir öngörüler yapılmasına olanak sağlar (Hritonenko & Yatsenko, 2013; Quarteroni, 2009). Aynı zamanda süreçlerin optimizasyonuna imkân tanıdığı için verimliliğin artırılmasına da katkıda bulunur. Modelin sanal ortamda benzetim çalışmalarında kullanılması ile maliyeti yüksek ve riskli deneylerin yapılma ihtiyacı ortadan kalkar. Karmaşık sistemlerin anlaşılması ve uygun çözümlerin üretilmesi için matematiksel modeller en iyi araçlardan biridir.

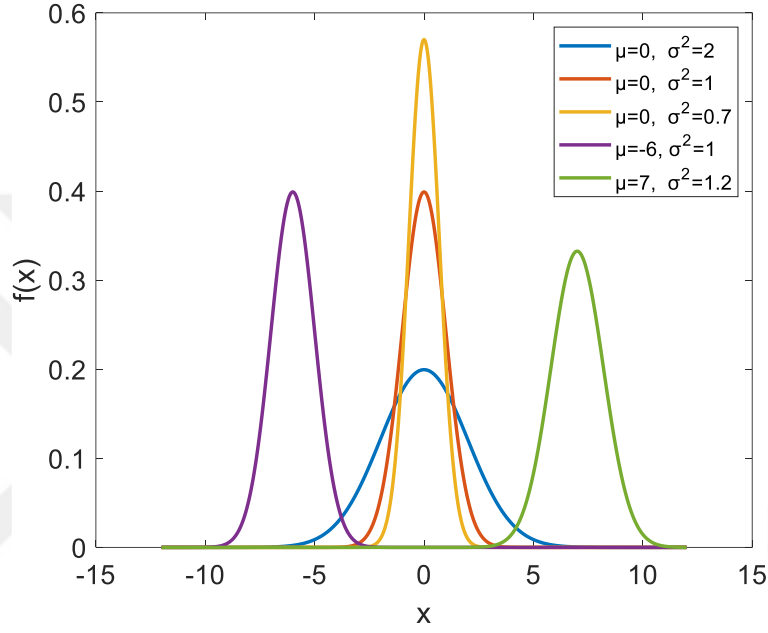
Tez çalışmasında da optimizasyon algoritmaları ile uyarlanabilir ısıtma modelleri oluşturabilmek için fanlı ısıtıcının matematiksel modeli çıkarılmıştır. Modelleme için ısıtma modellerinin Gauss eğrilerine benzerliğinden faydalanılarak Gauss dağılım fonksiyonu kullanılmıştır. Elde edilen matematiksel modelin indirgenmesi için ise dört parametrelili lojistik fonksiyonundan yararlanılmıştır.

1.6. Gauss Dağılım Fonksiyonu

Gauss diğer bir adıyla normal dağılım fonksiyonu, doğal süreçlerin modellenmesi, hata analizleri ve makine öğrenmesi gibi uygulama alanlarında matematiksel modelleme için kullanılan sürekli bir olasılık dağılımıdır (Goodman, 1963). Gauss dağılım fonksiyonu (5)'teki gibidir.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

Burada x ölçülen veya gözlemlenen değişkeni, μ dağılımın orta noktasını, σ standart sapmayı ve σ^2 ise varyansı ifade eder. Farklı μ ve σ^2 değerleri için Gauss dağılımına ait örnek grafikler Şekil 1’de verilmiştir.



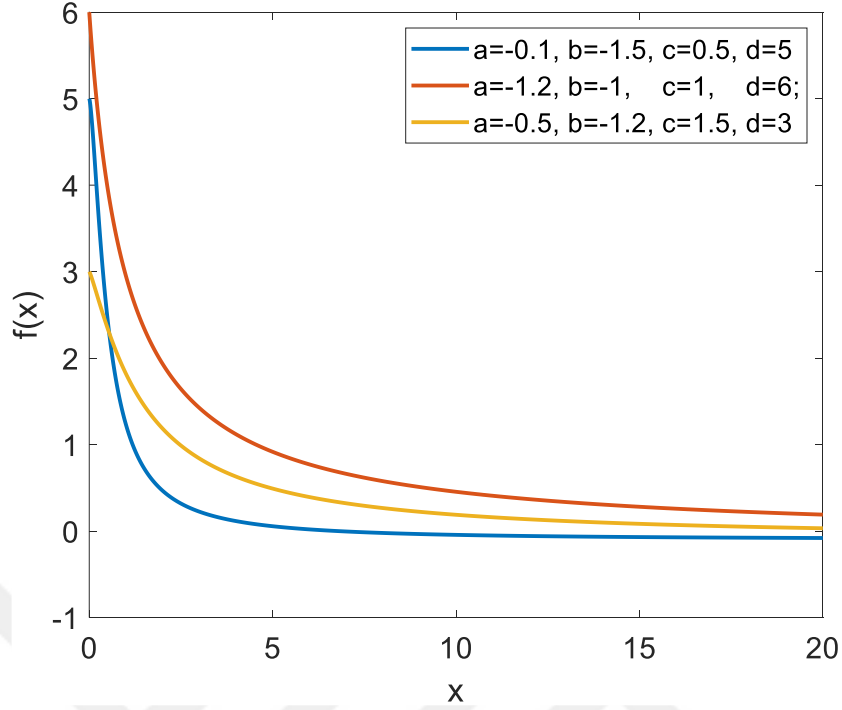
Şekil 1. μ ve σ^2 değerleri için örnek Gauss dağılımları

1.7. Dört Parametrelili Lojistik Fonksiyonu

Bu fonksiyon genellikle biyoloji ve istatistik gibi alanlarda değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak modellemede kullanılmaktadır (Menard, 2001). Fonksiyon, sigmoid şekilli eğriye benzemekle birlikte adını kullanılan parametre sayısından almıştır. Dört parametrelili lojistik fonksiyonu (6)’da verilmiştir.

$$f(x) = d + \frac{a - d}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^b} \quad (6)$$

Burada a ve d sırasıyla fonksiyonun alt ve üst sınırını, c büküm noktasını, b ise eğimin c noktasındaki dikliğini belirleyen parametreyi temsil etmektedir. Şekil 2’de farklı parametre değerlerinde dört parametrelili lojistik fonksiyonu için oluşturulan örnek eğriler verilmiştir.



Şekil 2. Örnek dört parametrelilik lojistik fonksiyonu eğrileri

Dört parametrelilik lojistik fonksiyonu bir değişkenin belirli aralıklarda davranışının modellenmesi gereken uygulamalarda oldukça kullanışlıdır.

1.8. Hata Tabanlı Performans Değerlendirme Metrikleri

Hata tabanlı performans değerlendirme metrikleri, bir modelin başarısının ölçümü için belirleyici olarak kullanılmaktadır. Modelin olması gerekenden ne kadar sapma gösterdiğini anlamak ve gerekli iyileştirmeleri yaparak modeli gerçeğe en uygun hale getirmek doğru performans metriklerinin seçilmesi ile mümkün olmaktadır. Bu bölümde yaygın olarak kullanılan performans değerlendirme metrikleri kısaca açıklanmıştır.

1.8.1. Ortalama Mutlak Hata

Ortalama mutlak hata (MAE), gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki farkın mutlak değerinin ortalaması alınarak hesaplanır. Matematiksel olarak basit olduğu için anlaması ve yorumlaması kolaydır. Dezavantajı olarak bu yöntemde büyük hatalara

duyarlılığının diğer yöntemlere göre daha az olduğu söylenebilir. Ortalama mutlak hata (7) kullanılarak hesaplanır (Willmott & Matsuura, 2005; Reich vd., 2016).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

Burada n veri sayısı, i gözlem sayısı, y_i gerçek değer ve $\hat{y}_i$ ise ölçülen değerdir.

1.8.2. Hata Kareleri Toplamı

Hata kareleri toplamı (SSE), gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki farkın karelerinin toplanmasıyla hesaplanır. Bu yöntemle tahmin edilen modelin toplam hatası bulunarak doğruluğu araştırılır. Hatanın karesi alındığı için büyük hatalara daha duyarlıdır. Genellikle optimizasyon algoritmalarında amaç fonksiyonu olarak tercih edilmektedir (Thinsungnoera vd., 2015; Nainggolan vd., 2019). Ancak tahmin edilen modelin doğruluğu araştırılırken tek başına yeterli değildir. Diğer performans değerlendirme metrikleri ile analiz edilmelidir. SSE'nin matematiksel ifadesi (8)'de verilmiştir.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

Burada n veri sayısı, i gözlem sayısı, y_i gerçek değer ve $\hat{y}_i$ ise ölçülen değerdir.

1.8.5. Ortalama Karesel Hata

Ortalama karesel hata (MSE), hatanın kareleri toplamının ortalaması alınarak elde edilir. Hata büyüklüğünün kritik öneme sahip olduğu uygulamalarda faydalıdır. Sürekli bir fonksiyon olduğu için optimizasyon algoritmalarında da kullanımı yaygındır (Hodson vd., 2021; Murphy, 1988). Bu yöntemde hatanın karesi alındığı için elde edilen sonucu yorumlamak birim değişikliği nedeniyle zorlaşır. Ortalama karesel hata (9) ile hesaplanır.

$$MSE = \frac{SSE}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9)$$

Burada n veri sayısı, i gözlem sayısı, y_i gerçek değer ve $\hat{y}_i$ ise ölçülen değerdir.

1.8.4. Kök Ortalama Karesel Hata

Kök ortalama karesel hata (RMSE), MSE'nin karekökü alınarak elde edilir. Bu yöntem MSE'nin biriminin uygun hale getirilmiş halidir ve bu sayede elde edilen sonuç daha kolay yorumlanabilir (Yuan, 2022; Draper vd., 2013). Bu yöntemin dezavantajı olarak büyük verilerin analizinde diğer metriklere göre daha fazla işlem yükü gerektirmesi söylenebilir. RMSE (10) ile hesaplanır.

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

Burada n veri sayısı, i gözlem sayısı, y_i gerçek değer ve $\hat{y}_i$ ise ölçülen değerdir.

1.8.5. R-Kare

R-Kare (R^2), (8)'de verilen SSE'nin toplam varyansa oranının birden çıkarılması ile elden edilen istatistiksel bir performans değerlendirme ölçütüdür. 0 ve 1 arasında değerler alır ve sonuç bire yaklaştıkça modelin başarı oranını yükselir. Bu yöntem tahmin edilen modelin gerçek verileri ne kadar iyi açıkladığını ölçme konusunda kullanışlıdır (Cameron & Windmeijer, 1997; Chicco vd., 2021). Aynı zamanda farklı modellerin karşılaştırılması için de bu yöntem uygundur. Değişken sayısının artırılması R^2 değerinin artmasını sağlasa da bu durum her zaman modelin iyileştiğini anlamını taşımayacağı için yanıltıcı olması yöntemin dezavantajı olarak sayılabilir. Toplam varyansın hesaplanabilmesi için öncelikle (11)'de verilen gerçek değerlerin ortalaması hesaplanır.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (11)$$

Burada n veri sayısı, i gözlem sayısı, y_i gerçek değer ve $\bar{y}$ ise gerçek değerlerin ortalamasıdır. Elde edilen bu değerden faydalanılarak toplam varyans (SST) ve R^2 , (12) kullanılarak hesaplanır.

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = \% \left(1 - \frac{SSE}{SST} \right) \times 100$$

1.9. Optimizasyon Algoritmaları

Sezgisel optimizasyon yöntemleri optimal çözümü bulmadaki başarılarından ötürü günümüzde anten tasarımı, biyomedikal iletişim ağları, kontrol sistemleri, robotik ve sinyal işleme gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu yöntemler optimal çözüme ulaşırken problem için önceden tanımlanan amaç fonksiyonlarını kullanırlar. Optimizasyonda hedef noktası amaç fonksiyonu için minimum veya maksimum değer elde edilmesi olabilir.

Bu bölümde ısıtıcı dizileri ile uyarlanabilir ısıtma modellerinin oluşturulabilmesi için kullanılan radyal hareket optimizasyonu (RHO), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve mayıs sineği optimizasyonu (MSO) algoritmaları hakkında bilgiler verilmiştir.

1.9.1. Radyal Hareket Optimizasyonu

Radyal hareket optimizasyonu (RHO) sürü tabanlı rastlantısal bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem 2014 yılında Rahmani ve Yusof tarafından sunulmuştur (Rahmani & Yusof, 2014). Özellikle çok değişkenli sistemlerin global optimizasyonu için verimli bir algoritmadır (Samuk & Çakır, 2023; Pardhu & Kota, 2021). Bazı açılardan diğer sürü tabanlı optimizasyon yöntemlerine benzemekle birlikte parçacıkların bir merkez noktasının etrafında yaptıkları radyal hareket bu yöntemin en belirgin farklılığıdır. Parçacıklar her yinelemede güncellenen bu merkez noktasına eşit uzaklıkta ancak farklı hızlarda hareket

eder. Parçacıkların mevcut konumları amaç fonksiyonuna girdi olarak verilir ve her parçacık için bir uygunluk değeri hesaplanır. Her yinelemede en iyi uygunluk değerine sahip parçacık R_{en_iyi} değişkenine atanır. Ayrıca tüm yinelemeler boyunca elde edilen en iyi uygunluk değerine sahip parçacık ise G_{en_iyi} değişkenine atanır. Diğer bir deyiş ile mevcut yineleme için en iyi çözüm R_{en_iyi} iken, tüm yinelemeler için ulaşılan en iyi çözüm ise G_{en_iyi} olur. Maksimum yineleme sayısına ulaşılması, en iyi uygunluk değerinin bulunması veya uygunluk değerindeki değişimin belirli bir eşiğin altına düşmesi gibi durma koşulu sağlandığında G_{en_iyi} problemin çözümünü vermektedir.

Akış diyagramı Şekil 3'te verilen algorithmada ilk olarak parçacıkların sayısı, boyutu ve arama uzayındaki sınırları belirlenir. Parçacıkların arama uzayını kapsayacak şekilde rastgele dağıtılması için (13) kullanılır.

$$X_{ij} = X_{\min(j)} + rand(0,1)(X_{\max(j)} - X_{\min(j)}) \quad (13)$$

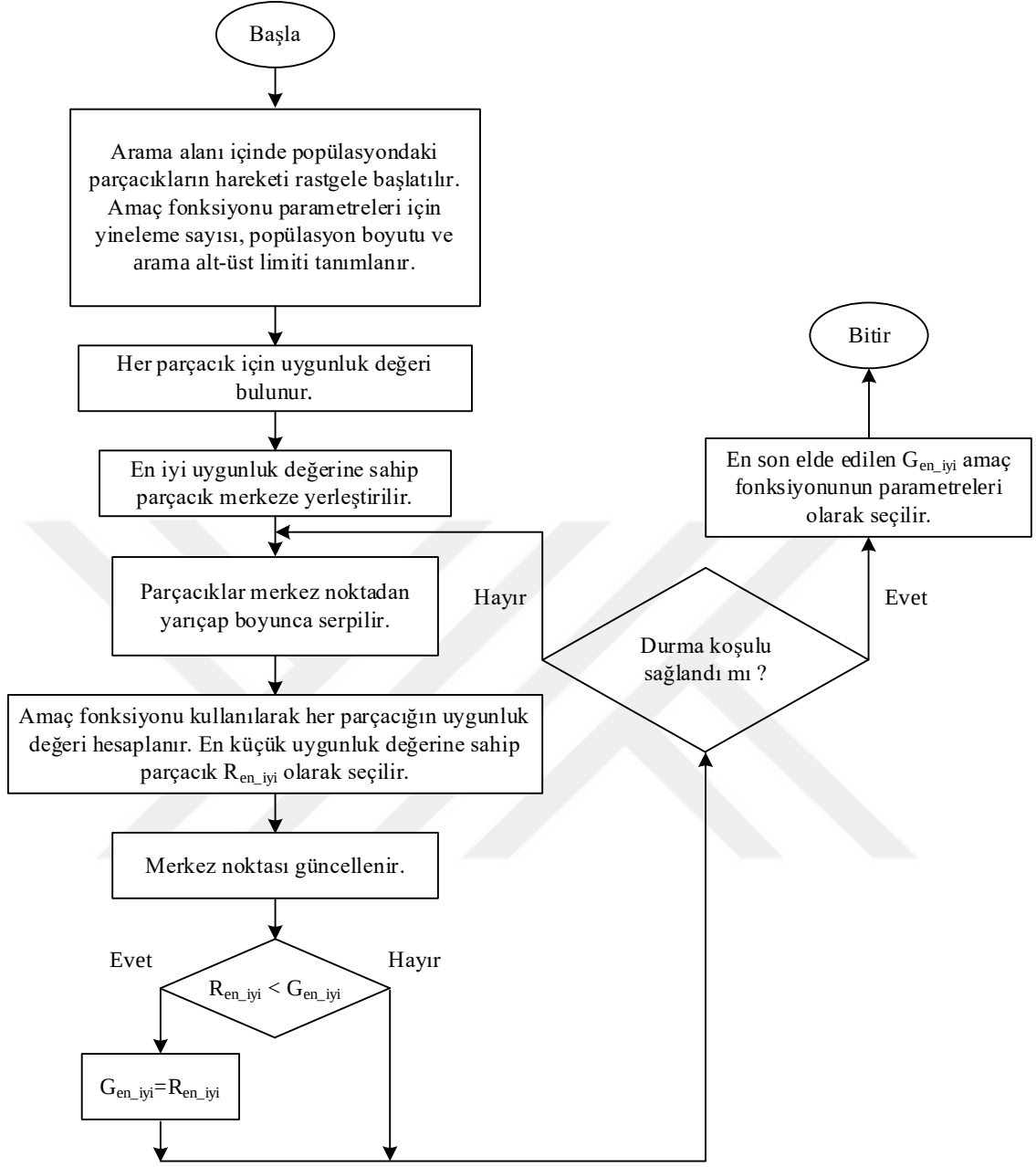
Burada X konum matrisi, i parçacık sayısı, j boyut sayısı, $X_{\max(j)}$ ve $X_{\min(j)}$ sırasıyla j boyutunun üst ve alt sınırı ve $rand(0,1)$ ise 0 ve 1 arasında rastgele bir sayıyı temsil etmektedir.

Parçacıkları hareket ettirmeden önce merkez noktanın (cp) belirlenmesi gerekmektedir. Merkez nokta seçildikten sonra parçacıklar bu merkezden belirli bir uzaklıkta rastgele hareket etmektedir. Her yinelemede tüm parçacıkların hızları V_{ij} matrisinde tutulmaktadır. Bu matrisin indisleri ve boyutu X_{ij} konum matrisi ile aynıdır. Parçacık hızları her yinelemede (14) ile rastgele olarak belirlenir.

$$V_{ij} = rand(0,1) \times V_{\max(j)} \quad (14)$$

$$V_{\max(j)} = \frac{X_{\max(j)} - X_{\min(j)}}{N}$$

Burada V_{ij} hız matrisi, i parçacık indisi, j boyut indisi, $V_{\max(j)}$ parçacığın j boyutundaki maksimum hızı, $rand(0,1)$ 0 ile 1 arasında düzgün dağılımlı reel sayı üretici ve N sıfırdan büyük pozitif bir tamsayıdır.



Şekil 3. RHO algoritmasının akış diyagramı

Eğer parçacık hızlarının yineleme indisine bağlı olarak azalacak şekilde belirlenmesi isteniyorsa (15) kullanılabilir. Bu durumda parçacıklar yineleme sayısı arttıkça birbirlerine daha yakın hareket etmeye başlar ve daha hassas arama yapar.

$$W_k = W_{max} - \left(\frac{W_{max} - W_{min}}{k_{max}} \right) k \quad (15)$$

$$V_{ij}^k = W_k rand(0, 1) V_{\max(j)}$$

Burada W_k eylemsizlik ağırlığı, $W_{\max}$ eylemsizlik ağırlığının üst sınırı, $W_{\min}$ eylemsizlik ağırlığının alt sınırı, k yineleme indisi ve $k_{\max}$ yineleme indisinin üst sınırıdır. Parçacık hızları belirlendikten sonra parçacıkların konumları (16) ile hesaplanır.

$$X_{ij} = V_{ij} + cp_j \quad (16)$$

Burada cp merkez noktadır. Parçacıkların hesaplanan yeni konumlarına göre uygunluk değerleri bulunur. Bu uygunluk değerlerine göre R_{en_iyi} ve G_{en_iyi} değişkenleri güncellenir. Ardından cp değişkeninin değeri (17) ve (18) kullanılarak bulunur.

$$cp^{k+1} = cp^k + up \quad (17)$$

$$up = C_1(G_{en_iyi} - cp^k) + C_2(R_{en_iyi} - cp^k) \quad (18)$$

Burada C_1 ve C_2 ağırlıklandırma sabitleridir. Bu sabitler yeni merkez noktasının bulunmasında mevcut yineleme ile o ana kadar gerçekleştirilen yinelemelerde elde edilen en iyi çözümlerin yeni merkez noktasının hesaplanmasındaki etkisini belirlemektedir. Bu sabitler genellikle 0,4 ile 0,9 aralığında seçilmektir. Ayrıca C_2 sabitinin C_1 'den büyük alınması önerilmektedir.

1.9.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu

PSO, doğadan esinlenerek geliştirilmiş bir sürü tabanlı optimizasyon algoritmasıdır. Algoritma karmaşık problemlerin en iyi çözümünü bulmak için kuş sürüleri ve balık topluluklarının doğadaki hareketlerinden ilham alınarak tasarlanmıştır. Bu yöntemin ilk uygulaması, 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından gerçekleştirilmiş ve yöntem (Kennedy & Eberhart, 1995) geliştirilerek bir optimizasyon algoritması olarak sunulmuştur. Günümüzde hala birçok optimizasyon gerektiren uygulamada kullanımı mevcuttur (Gad, 2022, Shami vd., 2022).

PSO’da sürü, her biri problemin çözüm adayı olan parçacıklardan oluşur. Parçacıklar, arama uzayında rastgele bir şekilde dağıtılır ve belirlenen sınırlar içerisinde her parçacık kendi en iyi konumu (kişisel en iyi) ve sürünün en iyi konumuna göre (küresel en iyi) hareket eder. Her yinelemede parçacıklar hızlarını ve yönlerini güncelleyerek tıpkı bir kuş sürüsünün yiyecek ararken birbiriyle iletişim kurup en iyi yiyecek kaynağını bulan kuşun konumuna yönelmesi gibi en iyi çözümü bulmaya doğru hareket eder.

Algoritmadaki parçacıkların boyutları çözülmek istenen problemi temsil eden amaç fonksiyonu ile aynıdır. Parçacıkların mevcut konumları x_i , ulaştıkları en iyi konum p_i ve hızları ise v_i vektörü ile tanımlanır.

Her yinelemede, tüm parçacıkların mevcut konum bilgileri (x_i) kullanılarak uygunluk değerleri hesaplanır. Hesaplanan değer, parçacığın önceki yinelemelerde bulunan en iyi uygunluk değerinden daha iyi ise, mevcut konumu p_i vektörüne atanır ve uygunluk değeri $p_{en_iyi_i}$ olarak güncellenir. Parçacıkların yeni konumları, mevcut hız vektörlerinin (v_i) mevcut konum vektörleri (x_i) ile toplanmasıyla elde edilir. Sürünün genelindeki en iyi uygunluk değeri g_{en_iyi} olarak isimlendirilir ve bu değere karşılık gelen konum p_g vektöründe saklanır. Parçacıkların hız vektörü (v_i), hem kendi p_i vektörüne hem de sürünün genelindeki p_g vektörüne göre belirlenir. Bu sayede parçacıkların topluca hareket etmesi ve yerel minimumlarına takılmadan küresel minimuma ulaşması sağlanır.

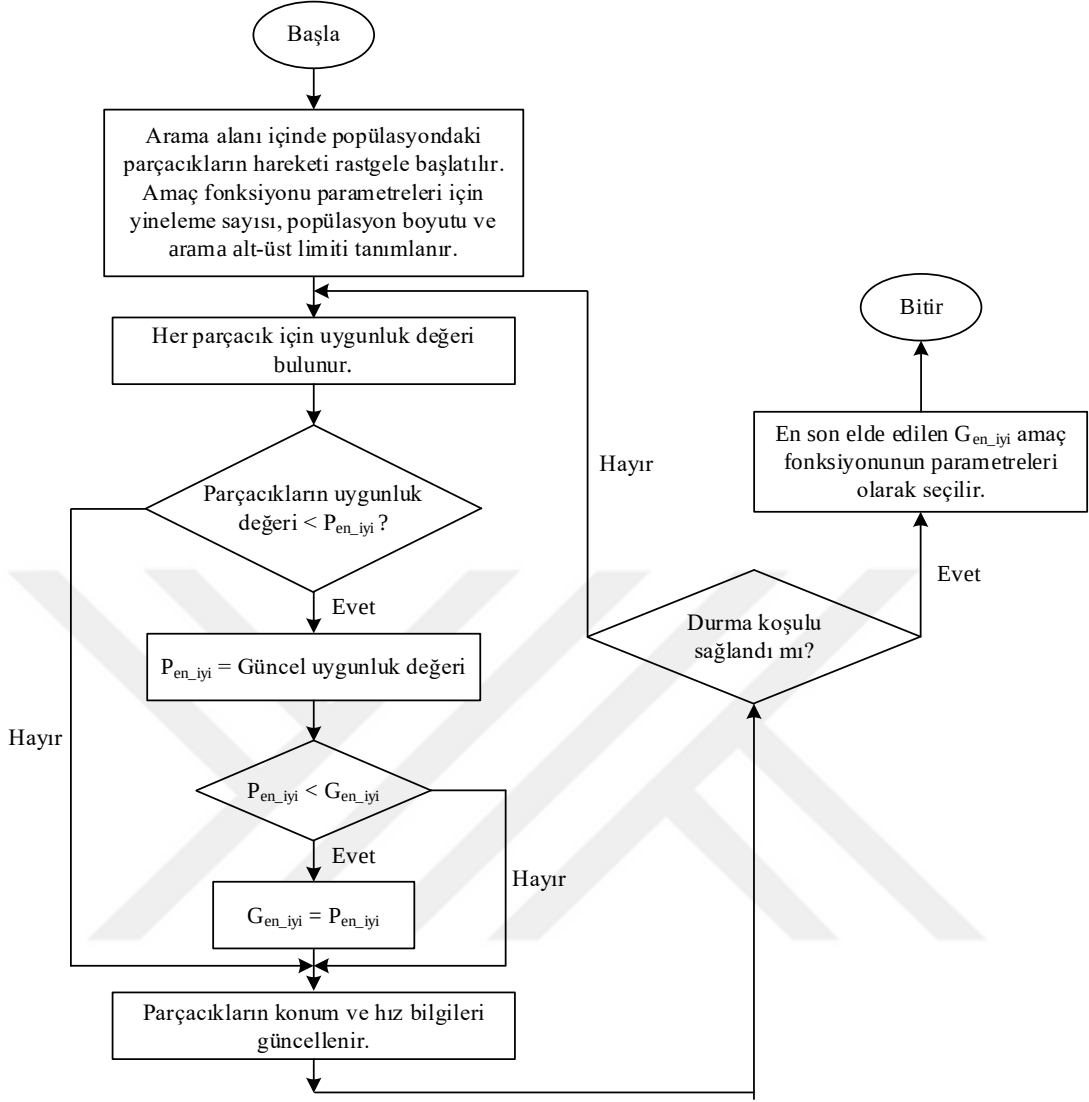
PSO algoritması tıpkı RHO’da olduğu gibi, maksimum yineleme sayısına ulaşılması, en iyi uygunluk değerinin bulunması veya uygunluk değerindeki değişimin belirli bir eşiğin altına düşmesi gibi durma koşulu sağlandığında sona erer ve p_g problemin en iyi çözümünü temsil eder.

PSO’nun akış diyagramı Şekil 4’te görülmektedir. Hız vektörü (20) ve konum vektörü (21) ile elde edilmektedir.

$$v_i = v_i + C_1 rand_1(p_i - x_i) + C_2 rand_2(p_g - x_i) \quad (20)$$

$$x_i = x_i + v_i \quad (21)$$

Burada C_1 ve C_2 öğrenme sabitleri, $rand_1$ ve $rand_2$ 0 ile 1 arasında uniform dağılımlı rastgele reel sayı üreteçlerdir.



Şekil 4. PSO algoritmasının akış diyagramı

1.9.3. Mayıs Sineği Optimizasyonu

MSO doğadan ilham alan bir sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. PSO ve RHO gibi popülasyon temelli bir yöntem olup, mayıs sineklerinin çiftleşme ve hareket dinamiklerinden esinlenerek geliştirilmiştir (Zervoudakis & Tsafarakis, 2020). MSO algoritması mayıs sineklerinin yaşam döngüsünü ve sosyal davranışlarını taklit eder. Bu sinekler kısa bir yaşam süresine sahiptir ve yaşam döngüleri üreme odaklıdır (Bogar vd., 2024; Nagarajan vd., 2022). Algoritmada, bu biyolojik süreçler iki ana aşamada modellenir:

Arama aşaması: MSO algoritmasında bireyler rastgele oluşturulur ve çözüm uzayına rastgele dağıtılır. Ardından erkek ve dişi bireyler arasındaki etkileşimler ile çözümler

geliştirilir. Erkekler birbirine uzak dururken, iyi çözümler yaklaştıkça hareketleri belirli bir düzene girer.

Sömürü aşaması: Mayıs sinekleri çiftleşir ve yeni bireyler oluşturur. Yeni bireyler önceki nesillerin en iyi çözümlerine göre yönlendirilir. Daha iyi çözümler elde edildikçe popülasyon daralır ve yakınsama sağlanır.

MSO algoritmasında Şekil 5'te görüldüğü gibi başlangıçta problem parametreleri belirlenir ve mayıs sineği popülasyonu rastgele oluşturulur. Hız ve konum değerleri rastgele girildikten sonra her bir bireyin uygunluk değeri bulunur ve en iyi çözüm belirlenir. Uygunluk değerlendirilmesi yapıldıktan sonra ise arama aşamasına geçilir. Bu kısımda erkek bireyler birbirine karşı itici bir kuvvet uygular ve farklı yönlerde hareket eder. Erkek bireylerin konumları ve hızları en iyi çözüm yönünde güncellenir.

Sömürü aşamasında erkek ve dişi bireyler eşleşir ve yeni bireyler üretilir. Bu aşamada daha iyi çözümler tercih edilerek popülasyon güncellenir. Popülasyon güncellendikten sonra durma kriteri (maksimum yineleme sayısı, istenen yakınsama değerine ulaşılması, vb.) değerlendirilir. Eğer durma koşulu sağlanmamış ise mayıs sineği popülasyonunu tekrar oluşturularak, döngü en iyi çözüm bulunana kadar devam ettirilir.

Mayıs sineklerinin hız ve konum güncelleme formülleri (22) ve (23)'te tanımlanmıştır. Bu ifadeler bireylerin en iyi çözüme yönelmesini sağlamaktadır.

$$v_i^{t+1} = a \cdot v_i^t + a_1 \cdot rand_1 \cdot (G_{en_iyi} - x_i^t) + a_2 \cdot rand_2 \cdot (P_{en_iyi} - x_i^t) \quad (22)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (23)$$

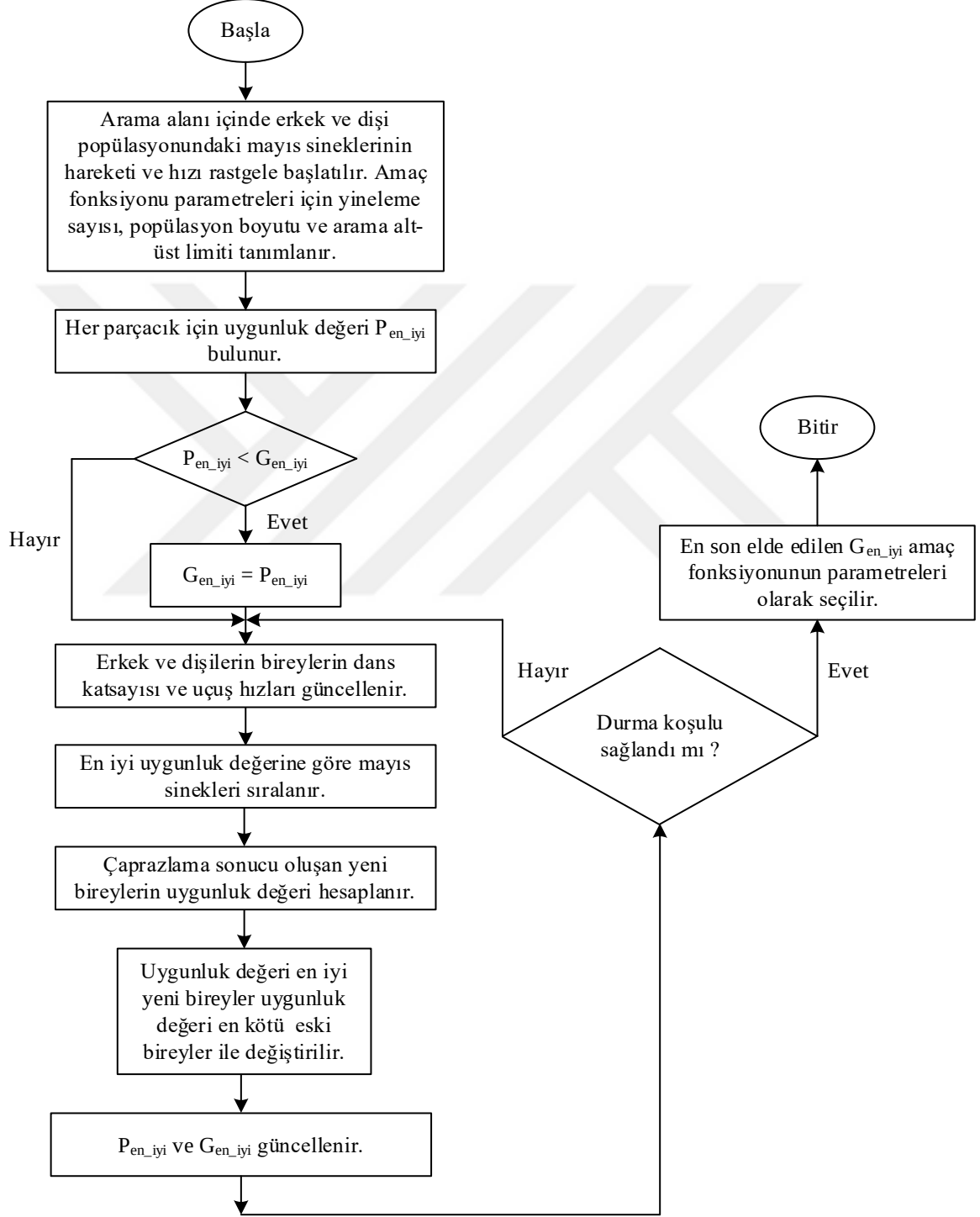
Burada, v_i^t , bireyin t . yinelemedeki hızı, x_i^t bireyin t . yinelemedeki konumu, g atalet ağırlığı, a_1 ve a_2 öğrenme faktörleri, $rand_1$ ve $rand_2$ [0, 1] aralığında rastgele reel sayılar, G_{en_iyi} küresel en iyi konum, P_{en_iyi} bireyin en iyi konumudur.

Erkek ve dişi mayıs sinekleri sömürü aşamasında çiftleşmek için birbirlerine çekilir. Dişi bireyin erkeğe yönelmesi (24) ve (25) ile hesaplanır.

$$v_f^{t+1} = g \cdot v_f^t + d \cdot rand_3 \cdot (m - x_f^t) \quad (24)$$

$$x_f^{t+1} = x_f^t + v_f^{t+1} \quad (25)$$

Burada, v_f^t dişi bireyin hızı, x_f^t dişi bireyin konumu, m dişinin eşleştiği erkek bireyin konumu, d dişi sineğin erkeğe yönelmesini sağlayan çekim faktörü ve $rand_3$ $[0,1]$ aralığında rastgele bir reel sayıdır.



Şekil 5. MSO algoritmasının akış diyagramı

Yeni bireylerin üretilmesi çaprazlama ve mutasyon eylemleri uygulanarak gerçekleştirilir. Çaprazlama işlemi (26) kullanılarak yapılır.

$$y_i = \lambda \times x_m + (1 - \lambda) \times x_f \quad (26)$$

Burada, y_i yeni bireylerin konumu, x_m ve x_f ise ebeveynlerin konumlarıdır, λ ise $[0,1]$ arasında rastgele seçilir ve genetik katkıyı belirler.

Mutasyon mevcut çözümlerin rastgele değiştirilmesi ile (27) kullanılarak gerçekleştirilir.

$$y_i^{t+1} = y_i^t + \mu \cdot N(0,1) \quad (27)$$

Burada, μ mutasyon faktörü, $N(0,1)$ ise sıfır ortalama ve bir varyans değerine sahip normal dağılımlı rastgele bir reel sayıdır. Mutasyon işlemi popülasyonun çeşitliliğini arttırarak yerel minimumlara takılmayı önler.

MSO algoritmasında dişi bireyler erkek bireylere doğru çekilir ve erkek bireyler rastgele bir şekilde hareket ederek en iyi çözüme yönelir. Çiftleşme sonucu çaprazlama ve mutasyon işlemi ile yeni bireyler oluşturulur. En iyi çözümler belirlenerek popülasyon güncellenir.

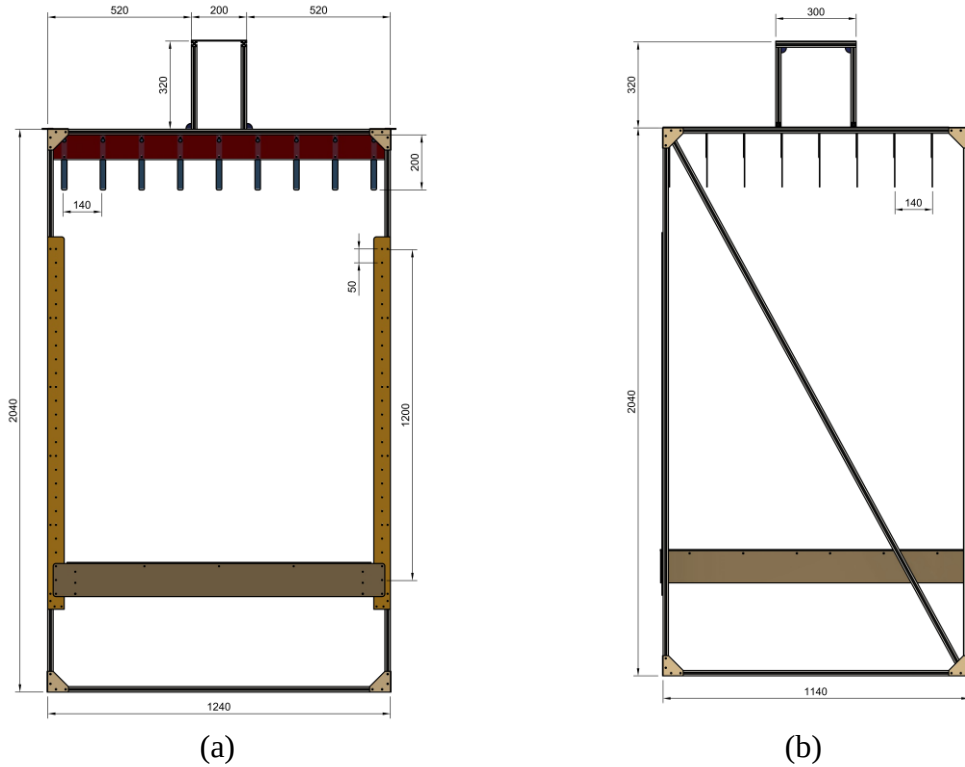
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Teorik Çalışmalar

Bu bölümde ölçüm sisteminin, algılayıcı devre kartının ve arayüz devre kartının tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur.

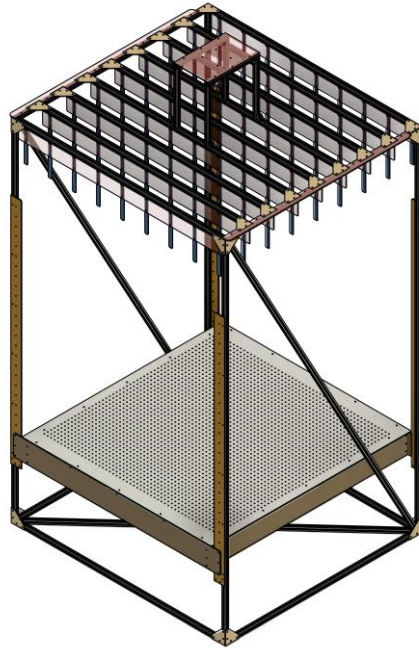
2.1.1. Ölçüm Sisteminin Tasarımı

Üç boyutlu sıcaklık ölçüm sistemi $2040 \times 1240 \times 1140$ mm boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklindeki mekanik kupa, algılayıcı dizisi, arayüz kartı ile bütünleşik mikrodenetleyici ve ısıtıcının yerleştirildiği ölçüm tablasından oluşmaktadır. Kupanın hafif, sağlam ve ergonomik bir yapıda olması için sigma profil ve bağlantı aparatları kullanılarak üretilmesi tercih edilmiştir. Ölçüm sisteminin tasarımı için Autodesk Fusion 360 programı kullanılmıştır. Sistemin mekanik boyutları mm cinsinden Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Ölçüm sisteminin üç boyutlu tasarımı (a) önden görünüm (b) yandan görünüm

81 algılayıcı devre kartı 9×9 ızgara diziliminde iki boyutlu dizi halinde kupanın üst tabanına yerleştirilmiştir. Dizilerde bulunan algılayıcı devre kartları ve diziler arasındaki mesafe 140 mm'dir. Kupanın en üst kısmında arayüz kartı ve mikrodenetleyicinin monte edilmesi için 6 mm plastik cam malzeme ve sigma profillerden oluşan $320 \times 300 \times 200$ mm boyutlarında küçük bir kupa yerleştirilmiştir. Bu sayede işlemcinin ısıdan etkilenmesi önlenerek oluşacak ölçüm hatalarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Kupanın alt tabanında 1100×1100 mm boyutlarında ısıtıcının yerleştirileceği ölçüm tablası bulunmaktadır. Ölçüm tablasına yerleştirilen ısıtıcı, kupanın yan direklerinde bulunan 50 mm adım aralığına sahip alüminyum kompozit malzemeden üretilen destekler yardımıyla dikey olarak algılayıcı dizisine doğru hareket ettirilerek üç boyutlu ısıtma modelleri elde edilmektedir. Tasarlanan ölçüm sisteminin genel görünümü Şekil 7'de görülmektedir.

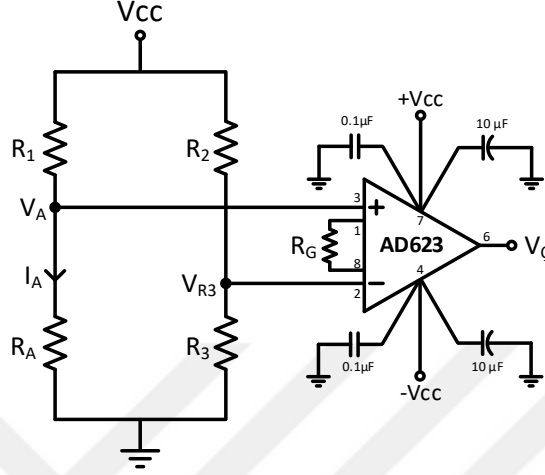


Şekil 7. Ölçüm sisteminin üç boyutlu tasarımının perspektif görünümü

2.1.2. Algılayıcı Devre Kartının Tasarımı

Tez çalışmasında sıcaklığın ölçümü için önerilen algılayıcı devre kartı, PT100 sıcaklık algılayıcı, AD623 fark yükseltici, direnç ve kondansatör elemanlarından oluşmaktadır. Devrenin şematik gösterimi Şekil 8'de verilmiştir. Burada V_A , I_A ve R_A sırasıyla algılayıcı

gerilimi, akımı ve direnci, R_1 ve R_2 gerilim bölücü dirençler, R_3 ofset direnci ve R_G yükseltecin kazanç direncidir. V_{CC} , V_{R3} ve V_{χ} ise sırasıyla besleme gerilimi, R_3 direnci gerilimi ve algılayıcı devre kartının çıkış gerilimidir.



Şekil 8. Algılayıcı devre kartının şematik çizimi

PT100, platin malzemeden üretilen bir direnç-sıcaklık algılayıcısıdır. 0°C 'de algılayıcı direnci $100\ \Omega$ olduğu için PT100 adını almıştır. Algılayıcının kılıfının olmaması kullanılan ısıya duyarlı platin malzemenin sıcaklık değişimlerine çok hassas ve hızlı bir şekilde tepki vermesini sağlamaktadır. Şekil 9'da PT100 algılayıcısı görülmektedir.



Şekil 9. PT100 sıcaklık algılayıcısı

Kararlı çalışması, yüksek hassasiyet ve doğruluğa sahip olması ve geniş ölçüm aralığı gibi avantajlarından dolayı endüstriyel üretim süreçleri, iklimlendirme sistemleri, tıbbi cihazlar ve enerji sektörü olmak üzere çok yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Yang & Wen, 2020; Wang vd., 2020; Sung vd., 2014). Algılayıcının dezavantajı olarak maliyetinin yüksek olması ve gürültüden etkilenmesi örnek verilebilir.

Direnç-sıcaklık algılayıcılarının temel özelliği sıcaklıkla birlikte direnç değerlerinin değişmesidir. PT100 algılayıcısının direnci sıcaklıkla doğru orantılıdır. Algılayıcı ile

sıcaklığın ölçülebilmesi için direnç değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu genellikle algılayıcıya sabit akım verilerek gerilim değişiminin ölçülmesi veya değişken akım durumunda akım ve gerilim değerlerinin ölçülmesi ile yapılmaktadır. Şekil 8’de önerilen devre yapısında algılayıcının ölçtüğü sıcaklık değerinin hesaplanabilmesi için R_A değerinin belirlenmesi gerekir. Devre parametreleri ve R_A direncinin belirlenmesi için gerekli tasarım adımları aşağıda verilmiştir.

Tasarım yapılırken PT100’ün maksimum akım dayanımı olan 1 mA değerinin aşılması gerekir. Buna göre PT100’ün üzerinden akan akımın maksimum değeri (28) ile ifade edilir.

$$I_{A_maks} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_{A_min}} [A] \quad (28)$$

Burada I_{A_maks} algılayıcının maksimum akım değeri, R_{A_min} ise ölçüm aralığındaki minimum algılayıcı direnç değeridir.

Bu devre yapısında V_A ve V_{R_3} gerilimleri farkı alınır ve yükselteç kazancı ile çarpılıp yükselti olarak mikrodnetleyicinin ADC’sine gönderilir. AD623 için yükselteç kazancı Y_K (29) ile hesaplanır.

$$Y_K = \frac{100 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1 \quad (29)$$

R_G direnci belirlenirken algılayıcı devresi çıkış gerilimi V_C ’nin kullanılacak mikrodnetleyicinin ADC gerilimini aşmamasına dikkat edilmesi gerekir. Buna göre tasarım yapılırken ölçüm aralığındaki maksimum sıcaklığa denk gelen algılayıcı direnci ve buna bağlı oluşan algılayıcı gerilimi dikkate alınarak maksimum yükselteç kazancı hesaplanmalıdır. Devrenin maksimum yükselteç kazancı Y_{K_maks} (30) kullanılarak bulunur.

$$\begin{aligned} V_{A_maks} &= \frac{V_{CC}}{R_1 + R_{A_maks}} \times R_{A_maks} [V] \\ V_{R_3} &= \frac{V_{CC}}{R_2 + R_3} \times R_3 [V] \\ Y_{K_maks} &= \frac{V_{ADC}}{V_{A_maks} - V_{R_3}} \end{aligned} \quad (30)$$

Burada V_{A_maks} ve R_{A_maks} sırasıyla algılayıcının ölçüm aralığındaki maksimum gerilim ve direnç değeri, V_{ADC} ise mikrodnetleyicinin ADC referans gerilim değeridir. Elde edilen Y_{K_maks} değeri (29)’da yerine konulursa R_G değeri (31)’deki gibi hesaplanır.

$$R_G = \frac{100 \times (V_{A_maks} - V_{R3})}{V_{ADC} - V_{A_maks} + V_{R3}} \text{ [k}\Omega\text{]} \quad (31)$$

Mikrodenetleyicinin ADC'sine iletilen V_{ζ} gerilimi (32) kullanılarak bulunabilir.

$$V_{\zeta} = Bit \times \frac{V_{ADC}}{2^n} \text{ [V]} \quad (32)$$

Burada n mikroişlemcinin ADC çözünürlüğü, bit ise ADC'ye iletilen gerilime karşılık gelen değeri temsil etmektedir. Devrede yükselteç giriş gerilimi V_G , V_{ζ} geriliminin Y_K değerine bölünmesi ile (33)'teki gibi elde edilir.

$$V_G = \frac{V_{\zeta}}{Y_K} = V_{\zeta} \times \frac{R_G}{R_G + 100 \text{ k}\Omega} \text{ [V]} \quad (33)$$

V_G gerilimi aynı zamanda (34)'teki gibi V_A ile V_{R3} gerilimlerinin farkı alınarak da hesaplanabilir.

$$V_G = V_A - V_{R3} \text{ [V]} \quad (34)$$

V_{R3} geriliminin hesaplanması için (35) kullanılır.

$$V_{R3} = V_{CC} \times \frac{R_3}{R_2 + R_3} \text{ [V]} \quad (35)$$

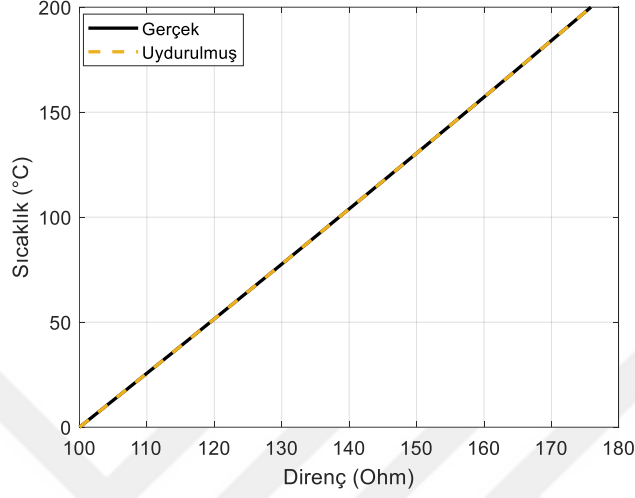
Elde edilen V_{R3} değeri (34)'te yerine koyulursa algılayıcı gerilimi V_A bulunmuş olur. Son adımda (36) ile algılayıcı akımı I_A hesaplandıktan sonra (37) yardımıyla algılayıcı direnci R_A 'nın değeri belirlenmiş olur.

$$I_A = \frac{V_{CC} - V_A}{R_1} \text{ [A]} \quad (36)$$

$$R_A = \frac{V_A}{I_A} = R_1 \times \frac{V_A}{V_{CC} - V_A} \text{ [\Omega]} \quad (37)$$

Algılayıcı direnci ile sıcaklık değerinin hesaplanabilmesi için PT100'ün katalog verileri kullanılarak MATLAB programında eğri uydurma işlemi yapılmıştır (Thermocouple

Inst. Ltd. 1999). Katalog verilerindeki sıcaklık değerlerine karşılık gelen direnç değerleri çizdirildiğinde algılayıcının doğrusal direnç-sıcaklık karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 10’da gerçek ve uydurulan eğrilere ait grafikler verilmiştir.



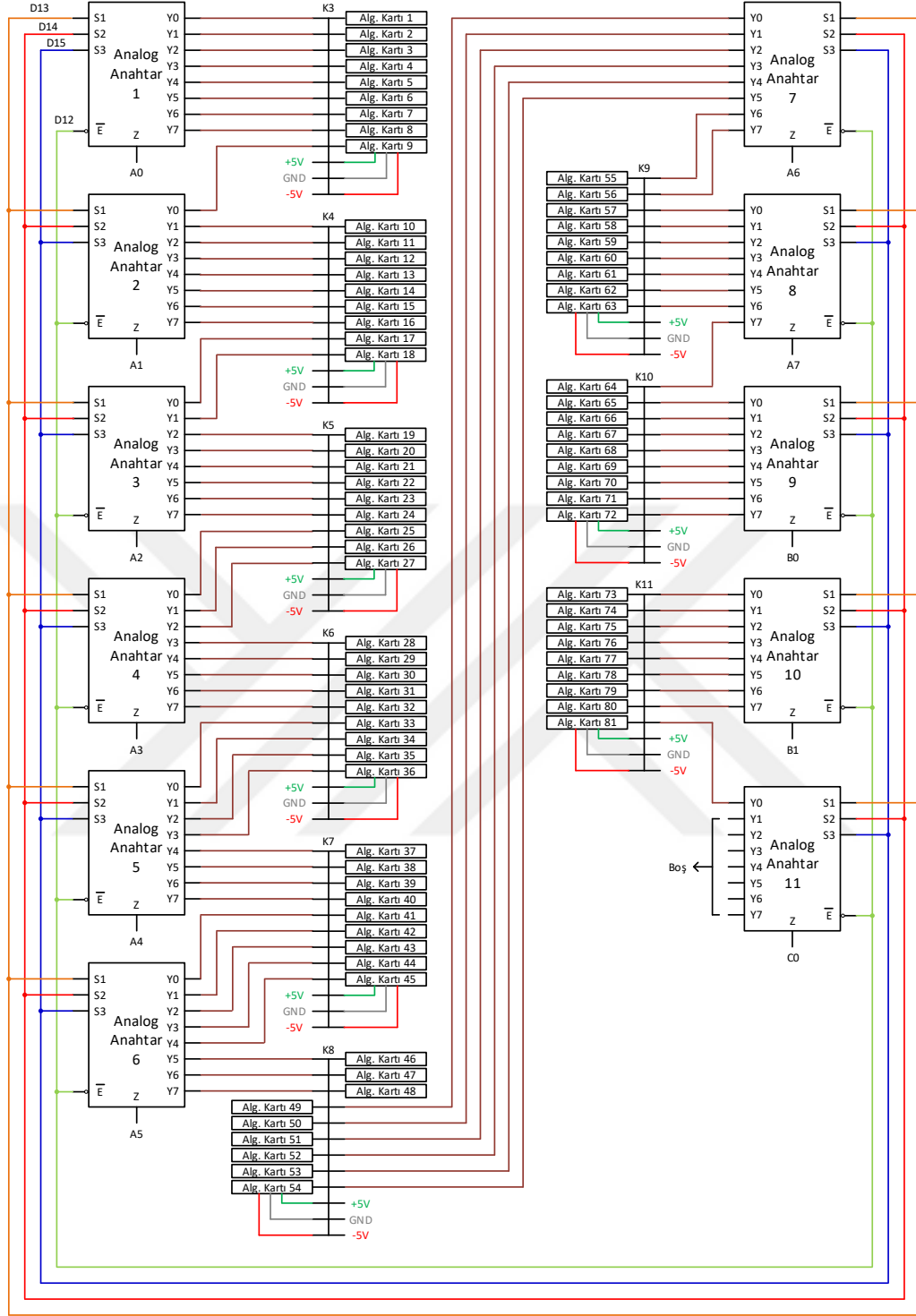
Şekil 10. PT100 için yapılan eğri uydurma grafiği

Uydurulan eğri için ortalama mutlak hata (MAE) 0,0078 °C olarak hesaplanmıştır. Uydurulan eğrinin denklemi (38)’deki gibidir. (37)’de bulunan R_A değeri (38)’de yerine yazılarak algılayıcı devresi ile ölçülen sıcaklık değeri elde edilmiş olur.

$$T = 0,001084R_A^2 + 2,337348R_A - 244,536664 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (38)$$

2.1.3. Arayüz Devre Kartının Tasarımı

Algılayıcı devre kartları ile mikrodenetleyici arasındaki veri iletimi arayüz devre kartı üzerinden yapılmaktadır. Kartın içerisinde 11 adet analog anahtar, bağlantı konektörleri ve enerji ve veri iletimini sağlayan bağlantı noktaları bulunmaktadır. Algılayıcı devre kartlarından okunan analog sıcaklık verileri arayüz kartında bulunan konektörler üzerinden analog anahtarlara, oradan da mikrodenetleyiciye iletilmektedir. Algılayıcı kartlarının çalışması için gerekli olan giriş gerilimi de arayüz kartı üzerinden dağıtılmaktadır. Arayüz devre kartının şematik gösterimi Şekil 11’de verilmiştir. Kart üzerinde ayrıca bilgisayar ile seri haberleşmenin yapılması, ısıtıcıların devreye alınıp çıkarılması ve diğer kontrol gerektiren durumlar için dijital çıkışlar yer almaktadır.



Şekil 11. Arayüz kartının şematik gösterimi

2.2. Deneysel Çalışmalar

Bu başlık altında algılayıcı devre kartı, arayüz devre kartı ve ölçüm sisteminin gerçekleştirilmesi, fanlı ısıtıcının matematiksel modelinin çıkarılması, dizi ölçüm

sonuçlarının elde edilmesi ve optimizasyon algoritmaları ile uyarlanabilir ısıtma modellerinin oluşturulması kapsamında yapılan çalışmalar sunulmuştur.

2.2.1. Algılayıcı Devre Kartının Gerçekleştirilmesi

Tezde önerilen algılayıcı devre kartı için sıcaklık ölçüm aralığı 0 – 200 °C olarak belirlenmiştir. Buna göre algılayıcı besleme gerilimi $V_{CC} = 5$ V ve devrede bulunan R_1 ve R_2 direnç değerleri 5600 Ω olarak seçilmiştir. Algılayıcı akımı I_A 'nın en yüksek değerine ulaştığı durum olan ölçüm aralığındaki en düşük sıcaklık için I_{A_maks} akım değeri (39) yardımıyla hesaplanır. R_{A_min} , 0 °C'deki algılayıcı direnci olup değeri 100 Ω 'dur.

$$I_{A_maks} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_{A_min}} = \frac{5}{5600 + 100} = 0,88 \text{ mA} \quad (39)$$

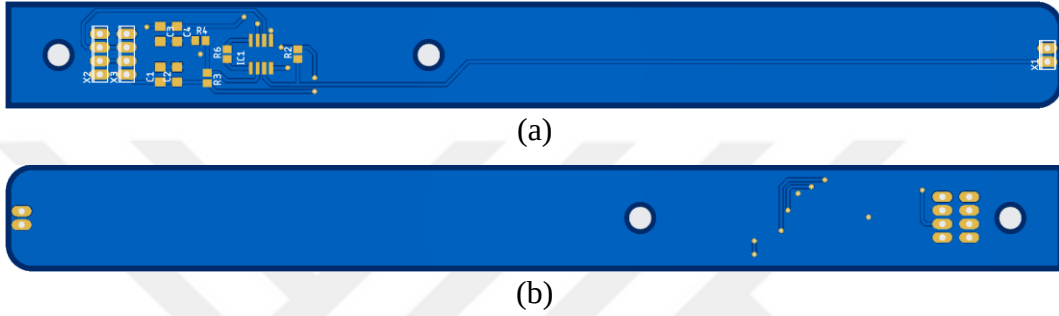
Elde edilen değer algılayıcı maksimum akım dayanımı olan 1 mA değerinden küçüktür ve istenilen sınırlar içerisinde. Devrede R_3 direnci ortam sıcaklığı nedeniyle oluşan ofseti gidermek amacıyla kullanılmıştır. R_3 'ün ölçüm aralığındaki minimum sıcaklık değerinden düşük olmaması gerekir. Aksi takdirde mikrodenetleyicinin ADC girişine negatif gerilim uygulanacağından bu durum kartın zarar görmesine neden olacaktır. Buna göre R_3 direnci 0 °C'deki algılayıcı direnç değerine eşit olacak şekilde 100 Ω seçilmiştir.

Ölçüm aralığındaki maksimum sıcaklık değerinde yine mikrodenetleyicinin zarar görmemesi için ADC referans geriliminin aşılmaması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan STM32F407'nin ADC gerilimi 3 V'tur. Buna göre maksimum yükselteç kazancı Y_{K_maks} (40) ile hesaplanır ve (41) kullanılarak R_G direncinin değeri bulunur. R_{A_maks} , 200 °C'deki algılayıcı direnci olup değeri 175,86 Ω 'dur.

$$\begin{aligned} V_{A_maks} &= \frac{V_{CC} \times R_{A_maks}}{R_1 + R_{A_maks}} = \frac{5 \times 175,86}{5600 + 175,86} = 152,24 \text{ mV} \\ V_{R_3} &= \frac{V_{CC}}{R_2 + R_3} \times R_3 = \frac{5}{5600 + 100} \times 100 = 87,72 \text{ mV} \\ Y_{K_maks} &= \frac{V_{ADC}}{V_{A_maks} - V_{R_3}} = \frac{3}{152,24 - 87,72} = 46,50 \end{aligned} \quad (40)$$

$$R_G = \frac{100 \text{ k}\Omega}{Y_{K_maks} - 1} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{46,50 - 1} = 2,198 \text{ k}\Omega \quad (41)$$

R_G direnci (41)'de elde edilen değere pratikte en yakın direnç değeri olan 2,2 k Ω seçilmiştir. Devredeki tüm parametre değerleri belirlendikten sonra 81 adet algılayıcı kartı 200 × 15 × 1,6 mm boyutlarında FR4 baskı devre kartları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Algılayıcı devresinin baskı devre kartının görünümü Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Algılayıcı devresinin baskı devre kartı (a) üstten görünümü (b) alttan görünümü

Devrede Analog Devices tarafından üretilen yüksek kazanç ve doğruluk değerine sahip ve düşük gürültülü AD623 fark yükselteci kullanılmıştır. Yüksek kararlılığı, doğruluğu ve kazanç değerinin ayarlanabilmesi gibi avantajlarından dolayı hassas ölçüm cihazlarının tasarımında bu yükselteç tercih edilmektedir. Yükseltecin çalışma gerilimi simetrik kaynak ile +5 V, 0, -5 V olacak şekilde ayarlanmıştır. Devrede yüksek ve düşük frekanslı gürültülerin bastırılması için sırasıyla 10 μ F ve 0,1 μ F değerlerinde tantal ve seramik kondansatörler kullanılmıştır.

2.2.2. Ölçümün Çözünürlük Analizi

Algılayıcı devre kartları gerçekleştirildikten sonra yapılan ölçümün hassasiyetini belirlemek için çözünürlük analizi yapılmıştır. $R_G = 2,2 \text{ k}\Omega$ için yükselteç kazancı (42)'deki gibi hesaplanır.

$$Y_K = \frac{100 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1 = \frac{100 \text{ k}\Omega}{2,2 \text{ k}\Omega} + 1 = 46,45 \quad (42)$$

Çözünürlüğün belirlenebilmesi için ilk olarak yükselteç çıkış gerilimindeki değişimin (ΔV_{ζ}) hesaplanması gerekir. ΔV_{ζ} değeri (43) yardımıyla bulunabilir.

$$\Delta V_{\zeta} = Y_K \times (V_{G_maks} - V_{G_min}) \quad (43)$$

Burada, V_{G_maks} ve V_{G_min} sırasıyla yükselteç giriş geriliminin maksimum ve minimum değerleridir. Giriş gerilimi maksimum değerini 200 °C’de alırken, minimum değerini ise 0 °C’de alır. Buna göre V_{G_maks} (44)’te verildiği gibi hesaplanır.

$$V_{G_maks} = V_{A_maks} - V_{R3} = 152,24 - 87,72 = 64,52 \text{ mV} \quad (44)$$

V_{G_min} değerinin hesaplanabilmesi için önce algılayıcının ölçüm aralığındaki minimum gerilim değeri V_{A_min} (45)’teki elde edilmiştir.

$$V_{A_min} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_{A_min}} \times R_{A_min} = \frac{5}{5600 + 100} \times 100 = 87,72 \text{ mV} \quad (45)$$

V_{A_min} değeri (46)’da yerine koyularak V_{G_min} bulunmuştur.

$$V_{G_min} = V_{A_min} - V_{R3} = 87,72 - 87,72 = 0 \text{ mV} \quad (46)$$

Mikrodenetleyicinin ADC çözünürlüğü 12 bit olup bit başına düşen gerilim değeri V_{bit} (47)’deki gibi hesaplanmıştır.

$$V_{bit} = \frac{V_{ADC}}{2^n} = \frac{3}{2^{12}} = 0,7324 \text{ mV/bit} \quad (47)$$

(44) ve (46)’da elde edilen değerler yerine koyularak ölçüm aralığındaki yükselteç çıkış gerilim değişimi (48)’deki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta V_{\zeta} = Y_K \times (V_{G_maks} - V_{G_min}) = 46,45 \times 64,52 \times 10^{-3} = 2,99 \text{ V} \quad (48)$$

Ölçüm aralığındaki sıcaklık değişiminin (ΔT), yükselteç çıkış gerilimi değişimine (ΔV_C) oranının V_{bit} değeri ile çarpılmasıyla çözünürlük değeri (49)'daki gibi elde edilmiştir.

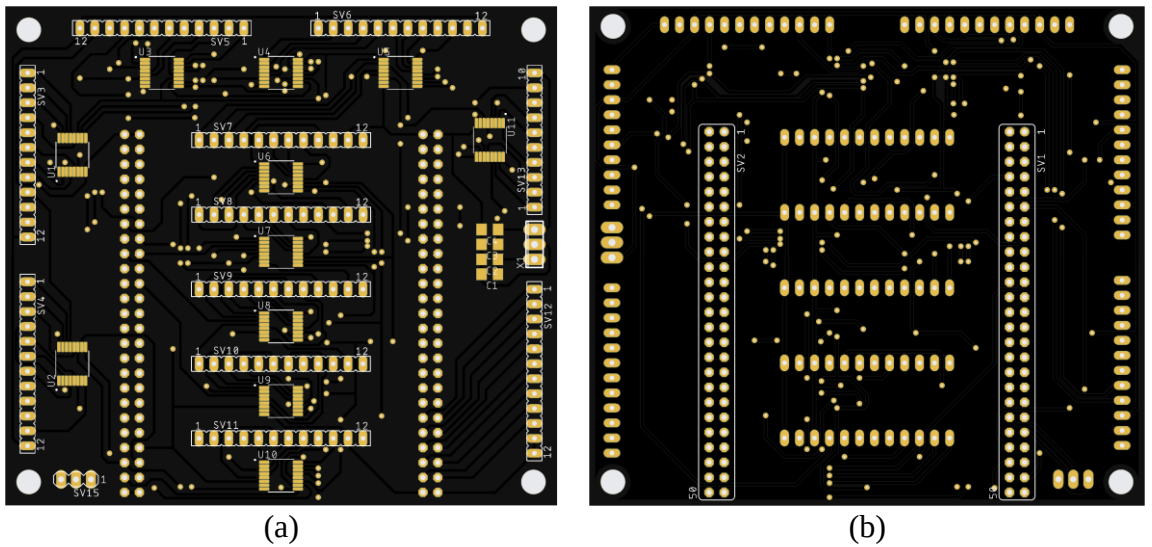
$$\text{Çözünürlük} = V_{bit} \times \frac{\Delta T}{\Delta V_C} = 0,7324 \times 10^{-3} \times \frac{200 - 0}{2,99} = 0,0489 \text{ } ^\circ\text{C/bit} \quad (49)$$

Elde edilen bu değer ölçüm sistemi ile yapılacak ölçümlerde sıcaklığın hassas bir şekilde belirlenmesi için yeterlidir.

2.2.3. Arayüz Devre Kartının Gerçekleştirilmesi

Arayüz devre kartında anahtarlama elemanı olarak NXP Semiconductors tarafından üretilen düşük iletim direncine sahip ($V_{CC} = 4,3 \text{ V}$ iken $0,5 \Omega$) NX3L4051 analog anahtarlama entegresi kullanılmıştır. Bu entegre üç adet dijital seçim girişi (S1, S2, S3), sekiz adet bağımsız giriş (Y0'dan Y7'ye) ve bir adet ortak çıkış (Z) bacağına sahiptir. Entegrenin çalışabilmesi için ayrıca etkinleştirme bacağı (E) bulunmaktadır. E girişine lojik 0 uygulandığında tüm anahtarlar iletim durumuna geçerken, lojik 1 durumunda ise yüksek empedanslı tıkama durumuna geçer.

Arayüz kartı $94 \times 85 \times 1,6 \text{ mm}$ boyutlarında FR4 baskı devre kartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Arayüz devresinin baskı devre kartının genel görünümü Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Arayüz devresinin baskı devre kartının genel görünümü (a) üstten (b) alttan

Arayüz kartının üzerinde STM32F407 mikrodnetleyicisinin yerleştirileceği iki adet 25×2 dişi konektör bulunmaktadır. Aynı zamanda algılayıcı devre kartlarının analog anahtarlar ile bağlantısını sağlamak için 10 adet 12×1 ve rölelerin aktif edilmesi ve diğer kontrol işlemlerinde kullanılmak üzere bir adet 10×1 erkek konektör vardır. Mikrodnetleyicinin bilgisayarla seri haberleşmesini sağlamak için kullanılan USB-TTL dönüştürücü bir adet 3×1 dişi konektöre bağlanmaktadır. Kartın üzerinde son olarak algılayıcı devre kartları ve analog anahtarların beslemesi için harici güç kaynakları üzerinden gelen $+5V$, 0 ve $-5V$ 'un dağıtılacağı bağlantı noktaları ve filtre için kullanılan kondansatörler yer almaktadır.

Analog anahtarların etkinleştirme bacakları (E) mikrodnetleyicinin D12 dijital çıkışı üzerinden kontrol edilmektedir. S1, S2 ve S3 seçici girişleri, 10 Hz anahtarlama frekansında sırasıyla D13, D14 ve D15 dijital çıkışları kullanılarak anahtarlammış ve 0,8 saniyelik periyotlarla 81 algılayıcıdan sıcaklık verileri gerçek zamanlı olarak alınmıştır. Anahtarlama durumlarına göre algılayıcı kartlarından alınan veriler Tablo 1'deki gibidir.

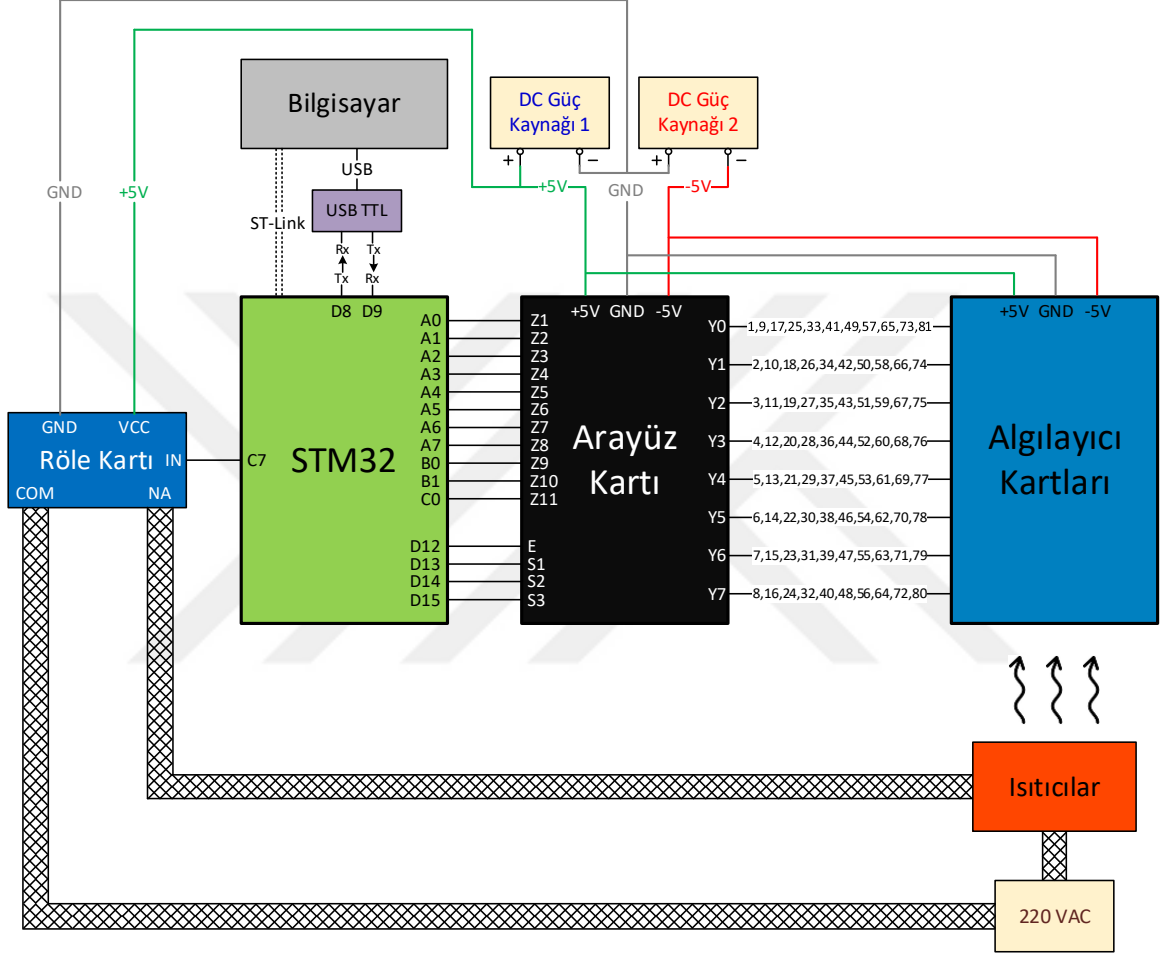
Tablo 1. Anahtarlama durumlarına göre algılayıcı kartlarından alınan veriler

Girişler					Çıkışlar
E	S3	S2	S1	Z	Algılayıcılar
0	0	0	0	Y0	1-9-17-25-33-41-49-57-65-73-81
0	0	0	1	Y1	2-10-18-26-34-42-50-58-66-74
0	0	1	0	Y2	3-11-19-27-35-43-51-59-67-75
0	0	1	1	Y3	4-12-20-28-36-44-52-60-68-76
0	1	0	0	Y4	5-13-21-29-37-45-53-61-69-77
0	1	0	1	Y5	6-14-22-30-38-46-54-62-70-78
0	1	1	0	Y6	7-15-23-31-39-47-55-63-71-79
0	1	1	1	Y7	8-16-24-32-40-48-56-64-72-80
1	X	X	X	0	-

Algılayıcı devre kartlarından gelen sıcaklık bilgileri analog anahtarların Z çıkış bacakları üzerinden mikrodnetleyicinin ADC girişlerine (A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, B0, B1 ve C0) aktarılmaktadır. Rölelerin açma kapama kontrolleri C7 dijital çıkışı üzerinden yapılırken, bilgisayar ile seri haberleşme yapabilmek için kullanılan USB-TTL dönüştürücü, STM32F407 ile D8 ve D9 bacakları üzerinden veri alışverişini gerçekleştirmektedir.

2.3. Ölçüm Sisteminin Gerçekleştirilmesi

Arayüz ve algılayıcı kartları gerçekleştirildikten sonra Şekil 14’te verilen blok şemaya uygun olarak ölçüm sisteminin kurulumuna geçilmiştir.



Şekil 14. Ölçüm sisteminin genel blok şeması

Algılayıcı devre kartları ± 5 VDC ile çalıştıkları için ölçüm sisteminde simetrik kaynak gereklidir. Bu nedenle DC Güç Kaynağı 1 ve DC Güç Kaynağı 2 birbirlerine seri bağlanıp, bağlantı noktası toprak potansiyeli olarak (GND) alınmıştır. Kaynaklar 5 VDC gerilime ayarlanarak devre kartları için gerekli olan -5 VDC, 0 VDC ve $+5$ VDC gerilim seviyeleri elde edilmiştir.

Fanlı ısıtıcılar tek fazlı olup, 220 VAC gerilim ile çalışmaktadır. Bu gerilim Şekil 14’te görüldüğü gibi 3 VDC kontrol sinyali ile tetiklenen röle kartları üzerinden fanlı ısıtıcılara uygulanmaktadır.

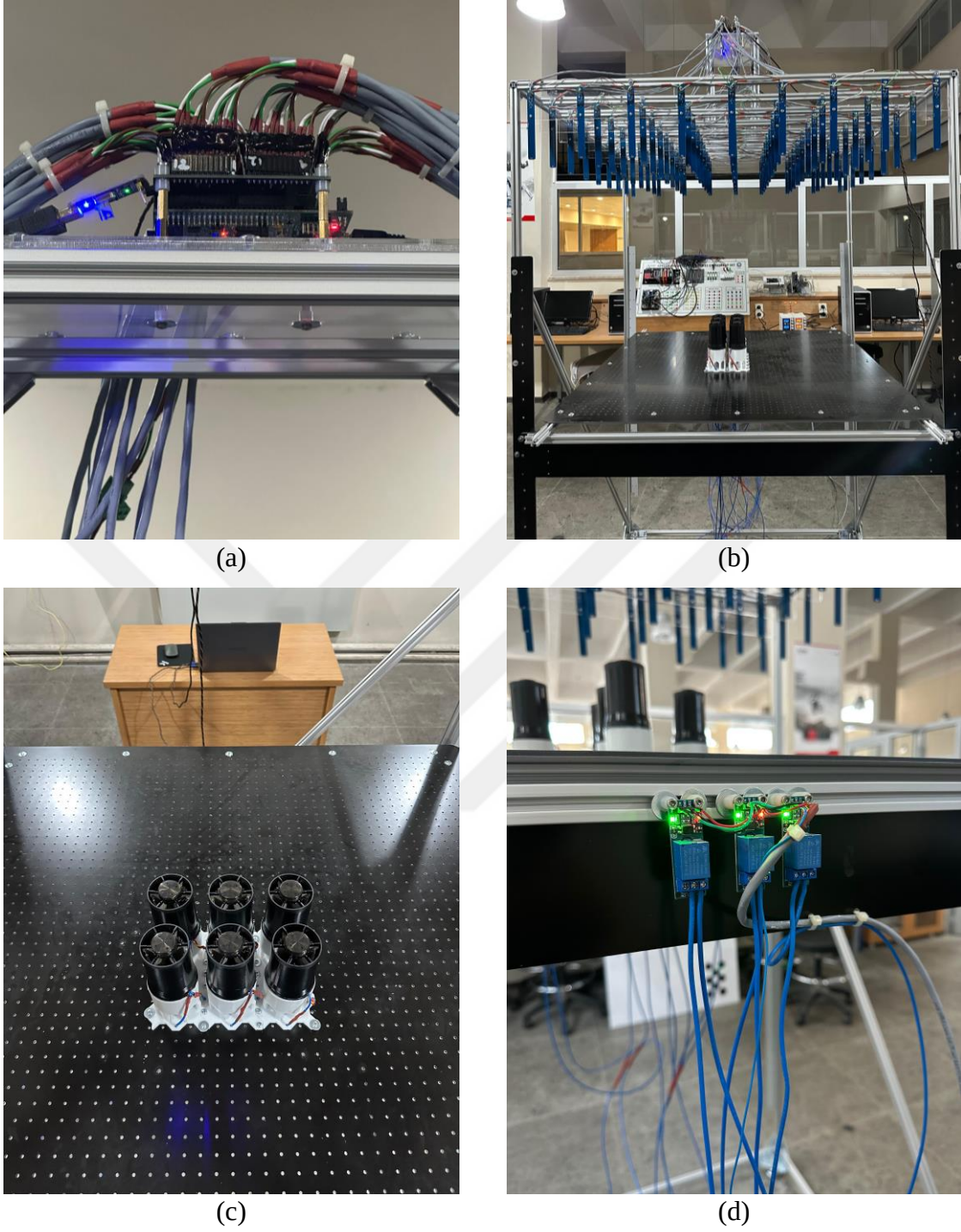
Tez kapsamında tasarım adımlarına uygun olarak ısıtıcıların üç boyutlu ısıtma modellerinin çıkarılması için gerçekleştirilen ölçüm sisteminin genel görünümü Şekil 15’te verilmiştir.



Şekil 15. Gerçekleştirilen üç boyutlu ölçüm sisteminin genel görünümü

Ölçüm sistemi Şekil 15’te görüldüğü gibi altı temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; (a) mikrodenetleyici ve arayüz kartı, (b) algılayıcı dizisi, (c) fanlı ısıtıcı dizisi, (d) ölçüm tablası, (e) DC güç kaynakları ve (f) dizüstü bilgisayardır.

Şekil 16’da ölçüm sisteminin bileşenlerinin farklı açılardan detaylı görünümleri verilmiştir.

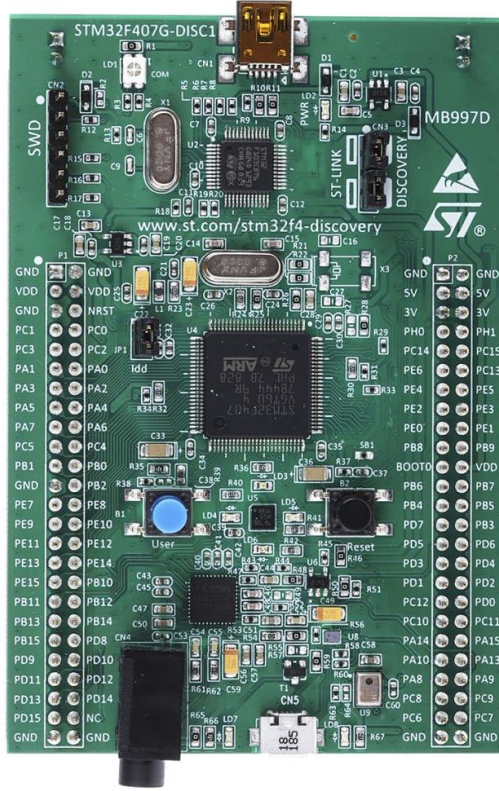


Şekil 16. Ölçüm sisteminin temel bileşenleri (a) STM32F407 mikrodnetleyici ve arayüz kartı (b) algılayıcı dizisi (c) fanlı ısıtıcı dizisi (d) röle kontrol kartları

Ölçüm sistemi gerçekleştirildikten sonra sıcaklık ölçümlerinin alınıp işlenmesi için gerekli olan gömülü yazılımın geliştirilmesine geçilmiştir. Bir sonraki bölümde tezde kullanılan STM32F407 mikrodnetleyici hakkında genel bilgiler verilmiş ve kartın programlanması için oluşturulan MATLAB/Simulink modelleri sunulmuştur.

2.3.1. STM32F407 Discovery Denetleyici Kartı

STMicroelectronics firmasının ürettiği bu işlemci, robotik, endüstriyel elektronik, otomasyon, güç elektroniği ve güç sistemleri gibi alanlarda gerçek zamanlı kontrol uygulamalarının yapılabilmesi için tasarlanmıştır. Kartın genel görünümü Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. STM32F407 denetleyici kartı (STMicroelectronics, 2020)

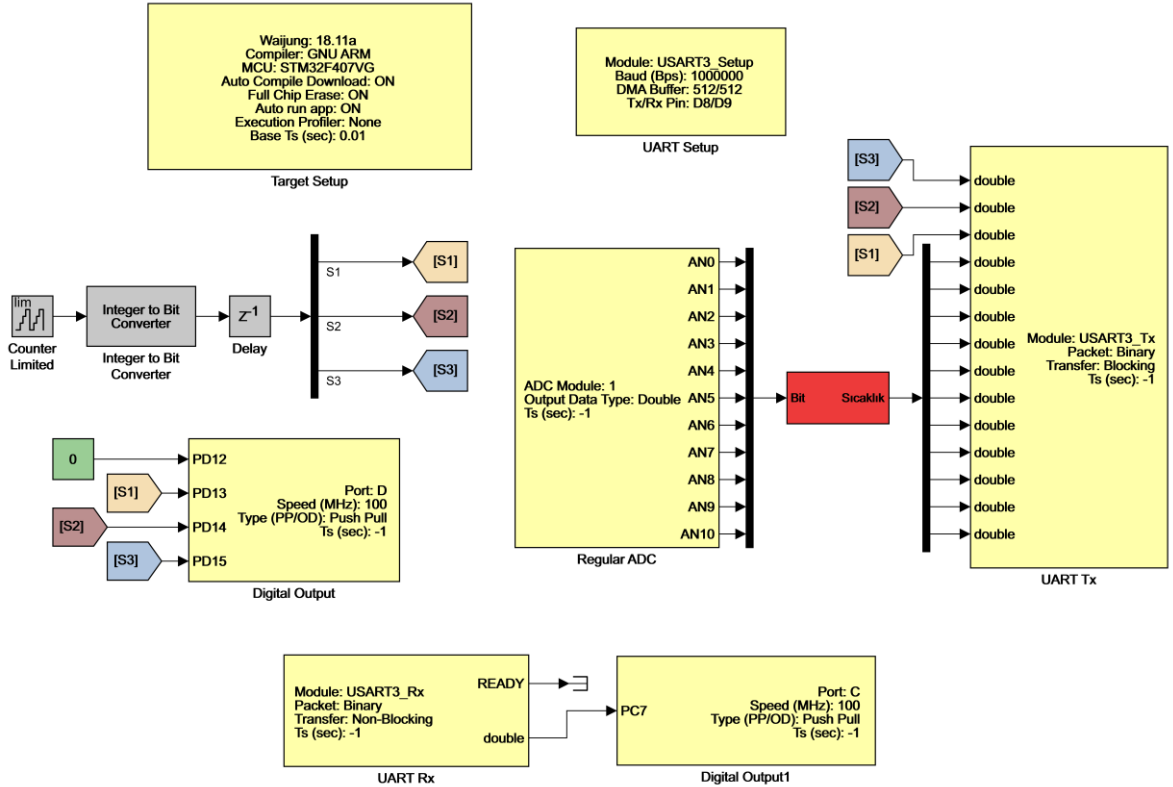
STM32F407 mikrodenetleyicisi, kullanımının kolay ve maliyetinin düşük olması, üzerinde bulunan ARM tabanlı işlemcinin yüksek çalışma hızının yanında düşük güç tüketimi sunması ve kodlama gerektirmeden MATLAB/Simulink üzerinden programlanabilmesi gibi avantajlarından dolayı deneysel çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir (Fekkak vd., 2021; Afandi vd., 2024; Ayyapan vd., 2023). Mikrodenetleyicinin temel özellikleri şunlardır:

- 168 MHz’e kadar çalışma hızı
- 32 bit kayan noktalı (floating point) ARM-Cortex-M4F CPU
- 192 kB RAM bellek

- 1 MB FLASH bellek
- Dahili ST-LINK/V2 hata ayıklama aracı
- 3×16 kanallı 12 bit ADC
- 40 adet PWM çıkışı
- 17 adet zamanlayıcı
- 3 adet I2C modülü, 6 adet USART modülü, 3 adet SPI modülü, 2 adet CAN modülü ve 1 adet SDIO modülü

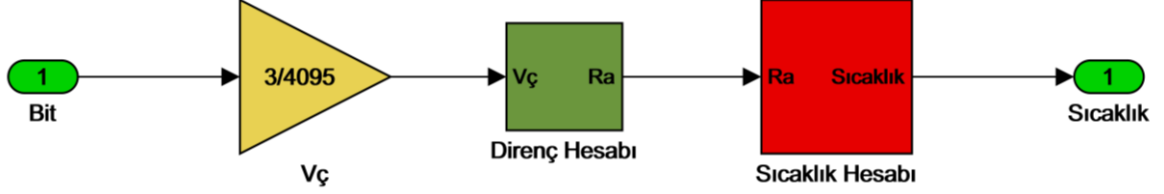
STM32F407 uygulama geliştirme kartı bu tez kapsamında seri haberleşme ile veri transferi ve kontrol uygulamalarının gerçekleştirilmesi için kullanılmıştır. Kartın programlanması MATLAB/Simulink ortamında AIMAGIN firması tarafından geliştirilen Waijung blok setleri kullanılarak yapılmıştır (Mulla, 2020; Hmidet & Boubaker, 2020; Koç vd., 2021). Bu blok setler, gerçek zamanlı simülasyonlarda STM32F407 mikrodenetleyicisi için gerekli C kodunu oluşturarak programlanabilmesine olanak sağlamaktadır.

STM32F407'nin programlanması için oluşturulan MATLAB/Simulink modeli Şekil 18'de verilmiştir.



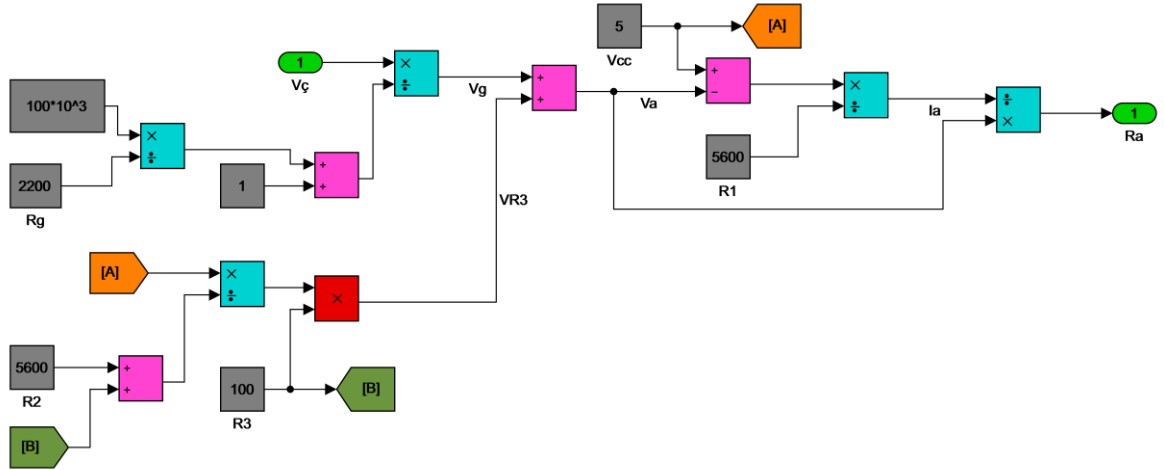
Şekil 18. STM32F407 ile sıcaklık verilerinin elde edilmesi için oluşturulan MATLAB/Simulink modeli

Burada röle kontrol sinyalleri UART Rx bloğu ile dijital çıkışa aktarılmaktadır. ADC bloğundan okunan analog değerlerin sıcaklık bilgisine dönüştürülüp UART Tx bloğuna iletilmesi için oluşturulan Bit Sıcaklık bloğunun iç yapısı Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19. Bit Sıcaklık bloğunun iç yapısı

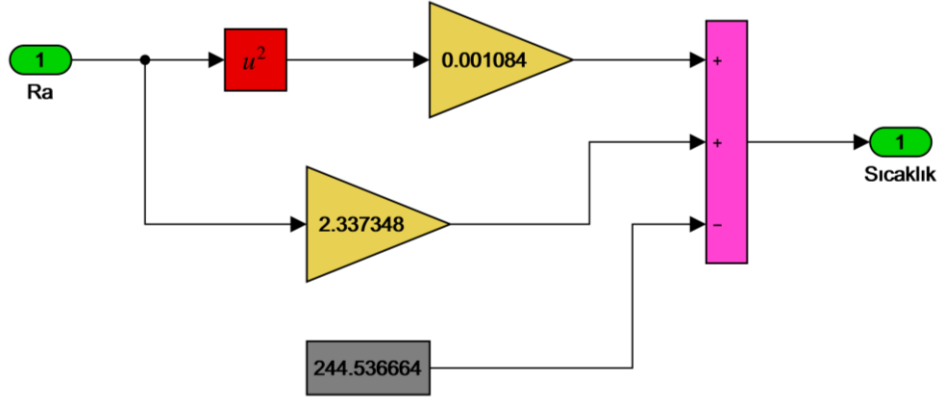
Algılayıcı devresi çıkış geriliminden algılayıcı direncinin elde edilmesi için kullanılan Direnç Hesabı bloğunun iç yapısı Şekil 20’de görülmektedir.



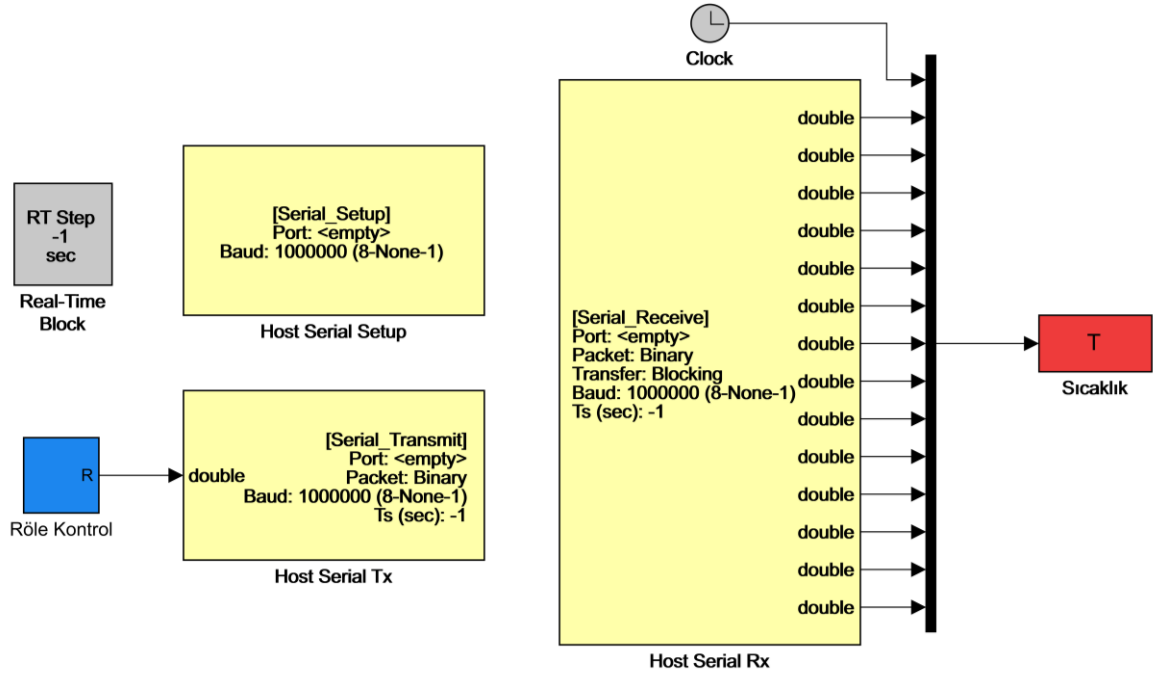
Şekil 20. Algılayıcı direncinin hesaplanması

Algılayıcı direncinden sıcaklığın elde edilmesi için kullanılan Sıcaklık Hesabı bloğunun iç yapısı Şekil 21’de verilmiştir.

Mikrodenetleyiciden gelen sıcaklık bilgisinin bilgisayara aktarılması için oluşturulan MATLAB/Simulink modeli Şekil 22’de verilmiştir. Host Serial Rx bloğu ile mikrodenetleyiciden alınan sıcaklık verileri Sıcaklık bloğu ile çizdirilmek üzere MATLAB/Editör ortamına aktarılmaktadır. Röle kontrol işaretleri ise Host Serial Tx bloğu ile dışardan mikrodenetleyiciye gönderilmektedir.



Şekil 21. Algılayıcı direnci kullanılarak sıcaklığın hesaplanması



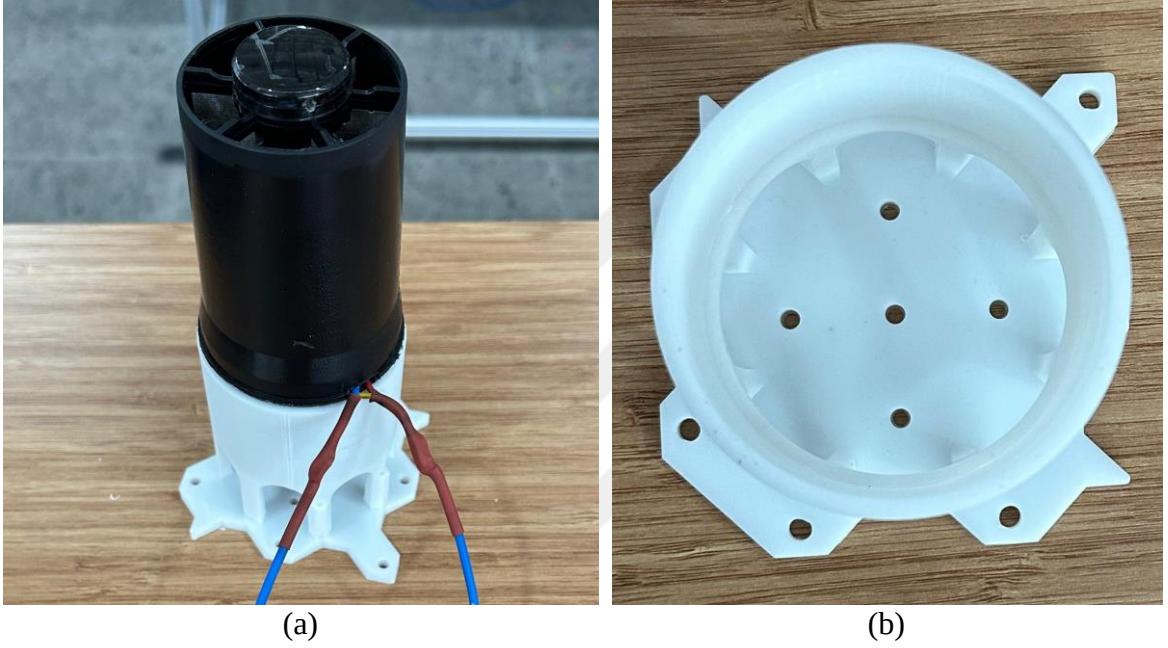
Şekil 22. Mikrodenetleyici ile bilgisayar arasındaki veri transferi için oluşturulan MATLAB/Simulink modeli

Ölçüm sistemi için yazılım geliştirme süreci tamamlandıktan sonra fanlı ısıtıcı ve ölçüm tablasının tasarımı ve matematiksel modelin elde edilmesine geçilmiştir.

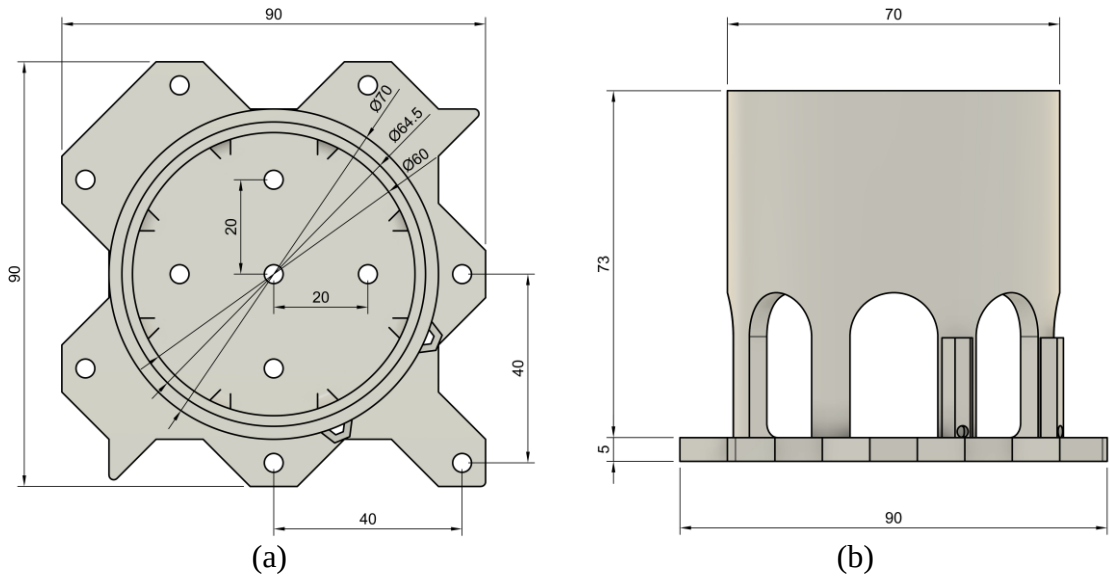
2.4. Fanlı Isıtıcının Matematiksel Modeli

Bu tez çalışmasında Şekil 23'te görülen 220 VAC gerilim ile çalışan 1400 W'lık fanlı ısıtıcılar kullanılmıştır. Fanlı ısıtıcıların ölçüm tablasına sabitlenmesi için tasarlanan montaj aparatının mm cinsinden boyutları Şekil 24'te verilmiştir. Bu aparat kullanılarak ısıtıcılar,

merkez noktaları arasında en az 8 cm olacak şekilde yan yana veya altlı üstlü olarak ölçüm tablasına yerleştirilebilmektedir. Montaj aparatının içerisine yerleştirilen fanlı ısıtıcı xy düzleminde vidalar yardımıyla ölçüm tablasına sabitlenmektedir. Montaj aparatı Autodesk Fusion 360 yazılımı kullanılarak modellenmiş ve reçineli üç boyutlu yazıcıda (Crealty Halot Sky) basılmıştır. Yüksek ısı ve mekanik dayanımı nedeniyle baskı işleminde reçine (Anycubic Tough Resine 2.0) kullanılmıştır.

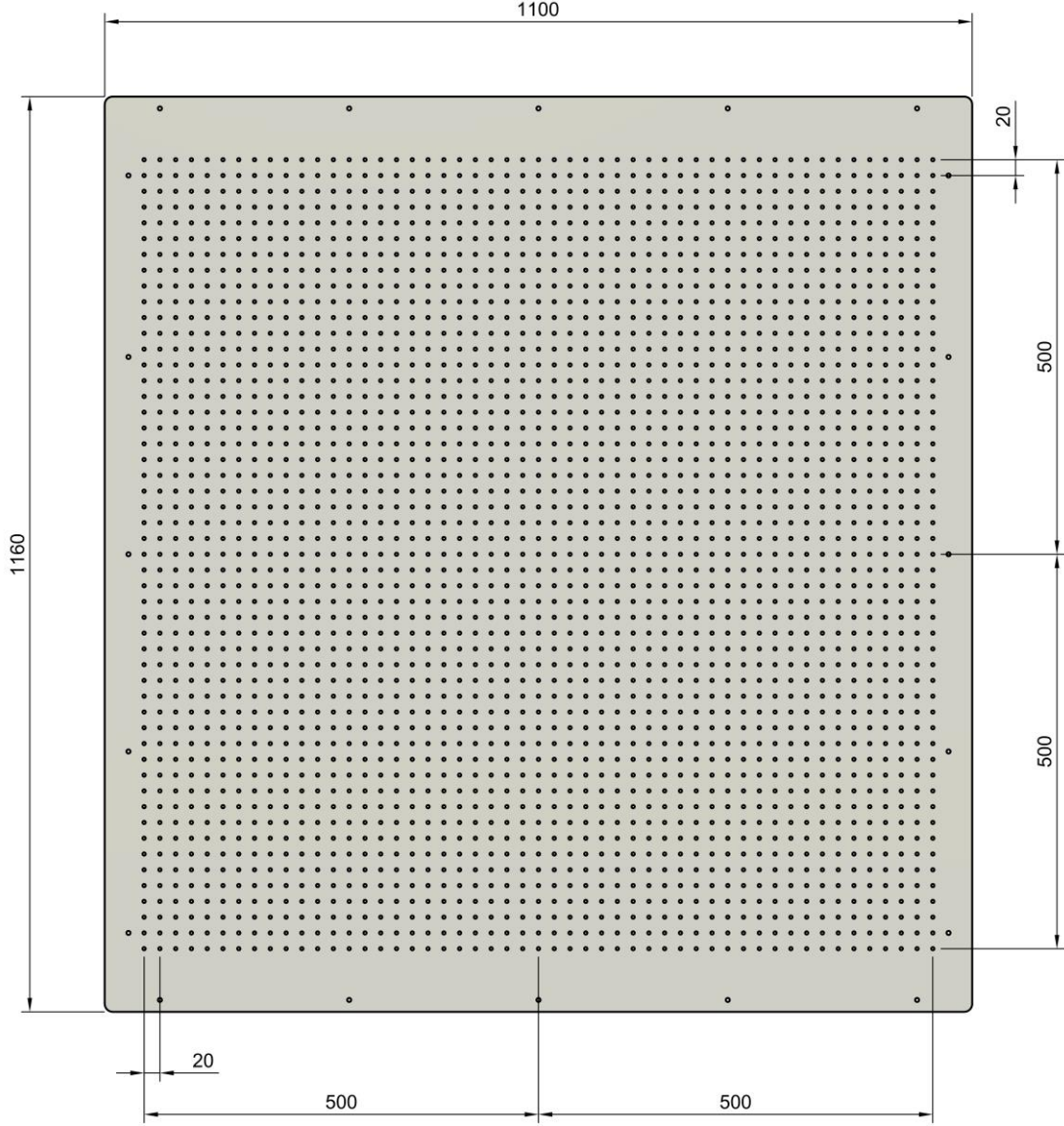


Şekil 23. Fanlı ısıtıcı (a) fanlı ısıtıcı ve montaj aparatı (b) montaj aparatı



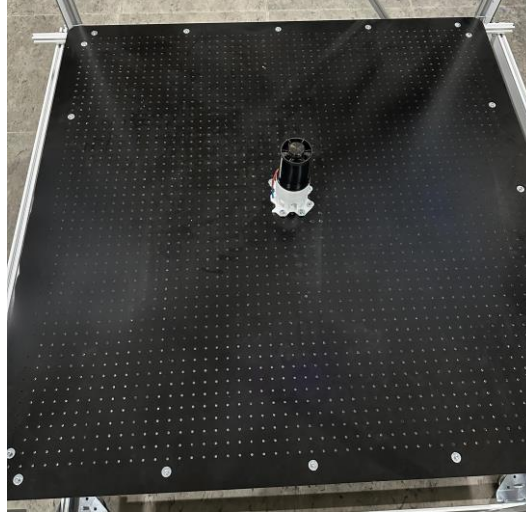
Şekil 24. Montaj aparatının boyutları (a) üstten görünüm (b) yandan görünüm

Isıtıcıların yerleştirildiği ölçüm tablasının Autodesk Fusion 360 programı ile oluşturulmuş modeli ve mm cinsinden boyutları Şekil 25'te verilmiştir. Ölçüm tablasında $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ yüzeye $51 \times 51 = 2601$ adet 4 mm çapında montaj yuvası açılmıştır. Böylece fanlı ısıtıcılar x ve y ekseninde 20 mm çözünürlüğünde ölçüm tablası üzerine yerleştirilebilmektedir.



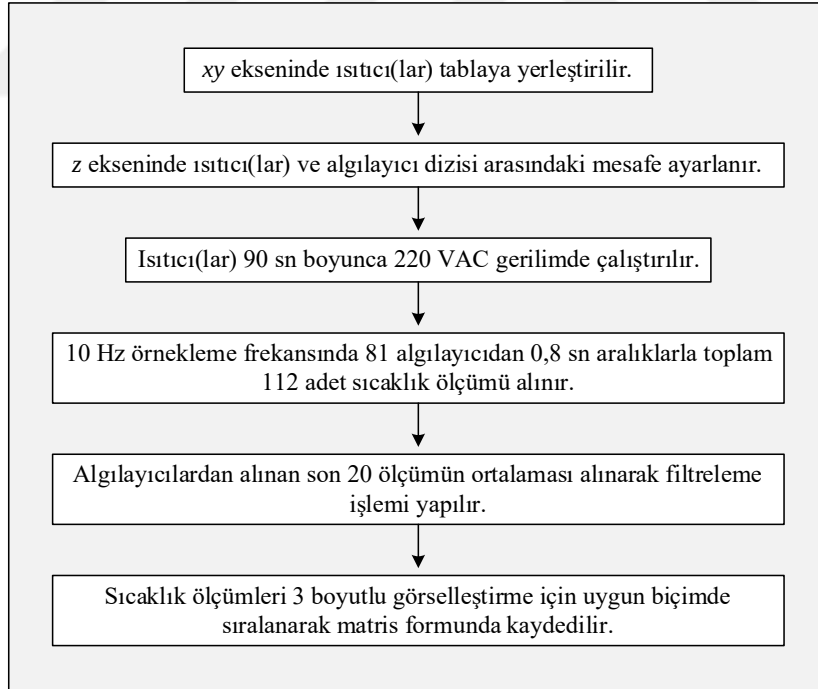
Şekil 25. Ölçüm tablasının boyutları

Matematiksel model için fanlı ısıtıcı Şekil 26'da görüldüğü gibi ölçüm tablasının orta noktasına yerleştirilerek ölçüm süreci başlatılmıştır. Isıtıcı ölçüm tablasının orta noktasında iken sıcak hava çıkış ucu tarafındaki merkez noktasının koordinatları $x = 0, y = 0$ ve $z = 0$ 'dır. Başka bir ifade ile bu nokta elde edilen ısıtma modelinin orijini (0, 0, 0).



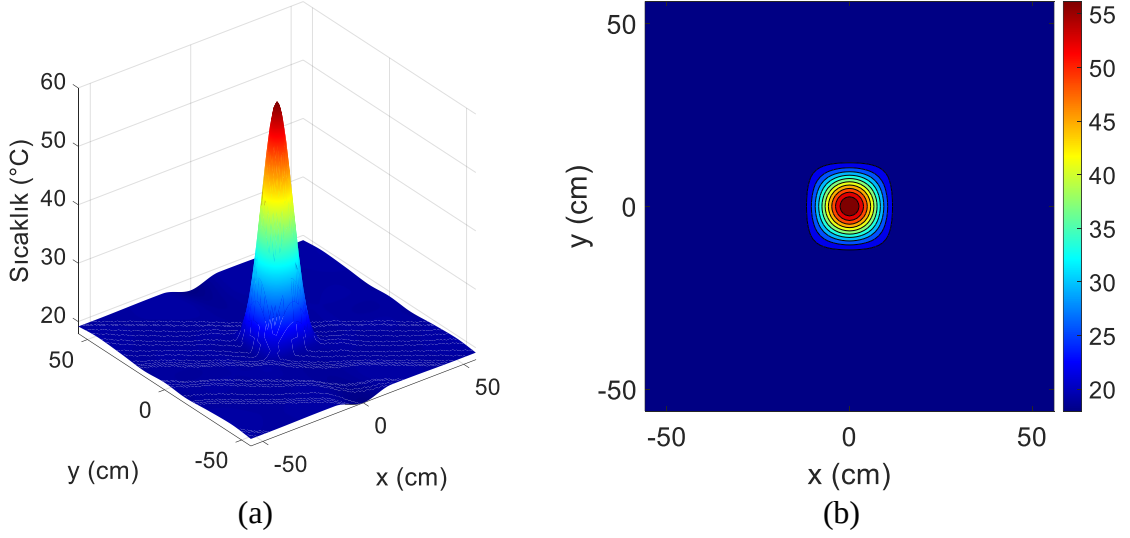
Şekil 26. Ölçüm tablasının merkezine yerleştirilmiş fanlı ısıtıcı

Ölçüm süreci Şekil 27’de verilen akış diyagramına göre yapılarak ısıtıcının üç boyutlu sıcaklık verileri elde edilmektedir.



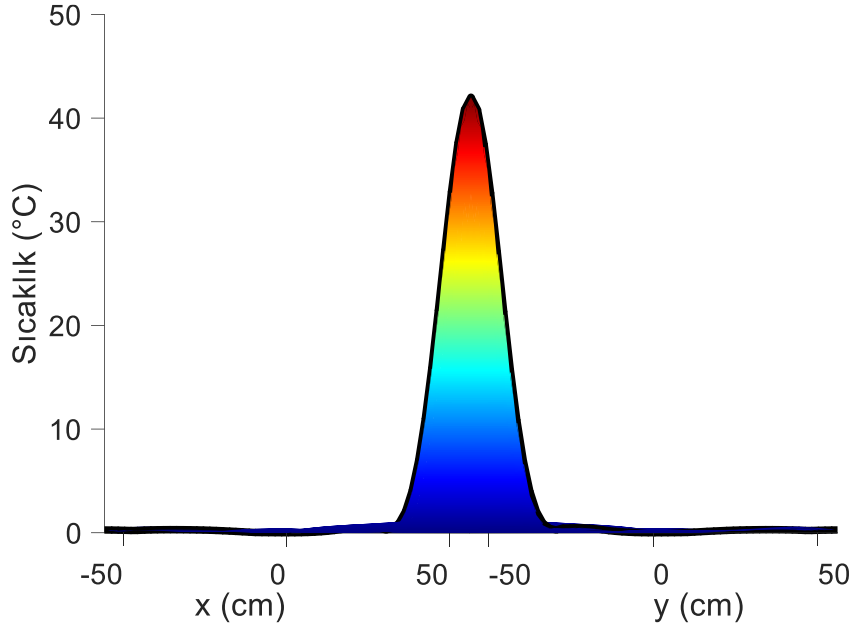
Şekil 27. Sıcaklık ölçüm işleminin akış diyagramı

MATLAB programında üç boyutlu sıcaklık ölçüm verilerine Makima ara değer hesaplama yöntemi uygulandıktan sonra ısıtma modelleri oluşturulmaktadır. $z = 10$ cm için fanlı ısıtıcıdan elde edilen üç boyutlu yüzey ve kontur grafikleri Şekil 28’de verilmiştir.



Şekil 28. $z = 10$ cm için ısıtma modelleri (a) yüzey grafiği (b) kontur grafiği

Isıtıcının matematiksel modeli yüzey grafiği kullanılarak elde edilmiştir. Bunun için öncelikle yüzey grafiğinde ortam sıcaklığı değeri çıkarılmalıdır. Şekil 29’da ortam sıcaklığı çıkarıldıktan sonra elde edilen yüzey grafiğinin iki boyutlu görünümü verilmiştir. Şekil 29’daki sıcaklık eğrisinin hem x ve hem de y eksenleri boyunca Gauss dağılımına benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 29. Yüzey grafiğinin iki boyutlu görünümü

Gauss dağılımının genel ifadesi (50)’de verilmiştir.

$$f(r) = a \times e^{-\left(\frac{r-b}{c}\right)^2} \quad (50)$$

Burada, a genlik sabiti, b orta nokta, c yayılım sabiti ve r orta noktaya olan uzaklıktır. Fanlı ısıtıcı, ölçüm tablasının merkezine yerleştirildiği için $x_1 = y_1 = 0$ olur ve dolayısı ile $b = 0$ olur. Bu durumda (50) yeniden düzenlenerek (51) elde edilir.

$$f(r) = a \times e^{-\left(\frac{r}{c}\right)^2} \quad (51)$$

İki boyutlu Gauss dağılımından üç boyutlu Gauss dağılımına geçmek için (52)'de tanımlanan değişken dönüşümünün yapılması gerekmektedir.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (52)$$

Matematiksel modelin elde edilmesi için ısıtıcı ile algılayıcı dizisi arasındaki uzaklık 10 cm'den 10'ar cm adımlar ile 120 cm'ye kadar arttırılarak, 12 sıcaklık ölçümü alınmıştır. Alınan ölçümlere (51)'de verilen Gauss dağılım fonksiyonu kullanılarak MATLAB programında eğri uydurma işlemi yapılmış ve Tablo 2'de verilen a ve c sabitleri elde edilmiştir.

Tablo 2. Eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen a ve c sabitleri

z (cm)	a	c	SSE	RMSE	R^2
10	41,9912	7,9056	48,2936	0,6626	0,9967
20	33,8448	7,9083	30,9082	0,5301	0,9967
30	27,6153	7,9052	22,1617	0,4489	0,9964
40	22,1155	7,9591	11,8299	0,3279	0,9971
50	18,3063	8,1532	6,2282	0,2380	0,9978
60	16,0691	8,6501	3,8851	0,1879	0,9983
70	13,4143	9,8591	6,0555	0,2346	0,9964
80	11,5692	11,2026	7,5827	0,2626	0,9945
90	9,9159	12,1217	6,0336	0,2342	0,9944
100	8,0697	13,4247	5,5125	0,2239	0,9926
110	8,2223	15,2451	2,1359	0,1393	0,9975
120	7,4025	15,9434	1,4787	0,1159	0,9979

Fanlı ısıtıcının üç boyutlu matematiksel modeli (x, y, z) 'ye bağlı olmalıdır. Dolayısı ile a ve c sabitlerinin z koordinatı ile ilişkilendirilmesi gerekir. Bunun için yine MATLAB programında eğri uydurma işlemi yapılarak dört parametrelili lojistik fonksiyonu ile a ve c 'nin z 'ye bağlı ifadeleri (53) ve (54)'teki gibi elde edilmiştir. Fonksiyonlara ait katsayılar Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.

$$a = ka_4 + \frac{ka_1 - ka_4}{1 + \left(\frac{z}{ka_3}\right)^{ka_2}} \quad (53)$$

$$c = kc_4 + \frac{kc_1 - kc_4}{1 + \left(\frac{z}{kc_3}\right)^{kc_2}} \quad (54)$$

Burada ka_1 , ka_2 , ka_3 ve ka_4 ve kc_1 , kc_2 , kc_3 ve kc_4 sırası ile a ve c sabitleri için elde edilen dört parametrelili lojistik fonksiyonunun katsayılarıdır.

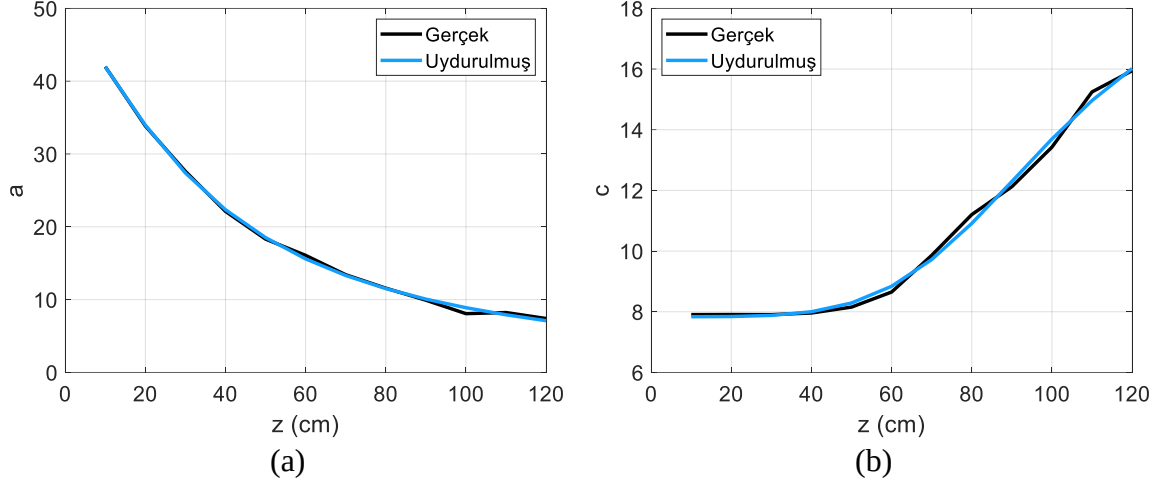
Tablo 3. Dört parametrelili lojistik fonksiyonunun a sabiti için elde edilen katsayıları

ka_1	ka_2	ka_3	ka_4	SSE	RMSE	R^2
-0,1986	-1,4430	35,9750	48,6084	1,2878	0,4012	0,9991

Tablo 4. Dört parametrelili lojistik fonksiyonunun c sabiti için elde edilen katsayıları

kc_1	kc_2	kc_3	kc_4	SSE	RMSE	R^2
7,8355	4,6449	99,7571	19,4846	0,3582	0,2116	0,9964

Tablo 3 ve Tablo 4'te elde edilen katsayılar kullanılarak a ve c sabitleri için uydurulan eğriler Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 30. Eğri uydurma grafikleri (a) genlik sabiti (b) yayılma sabiti

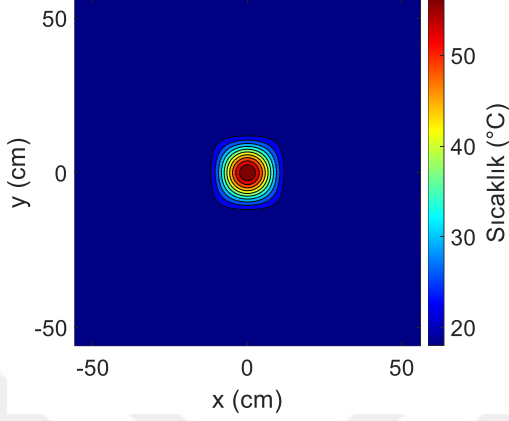
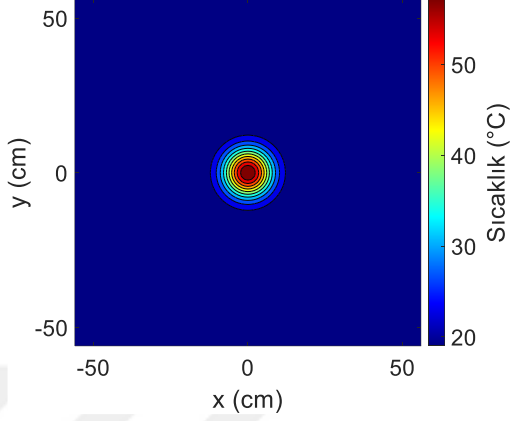
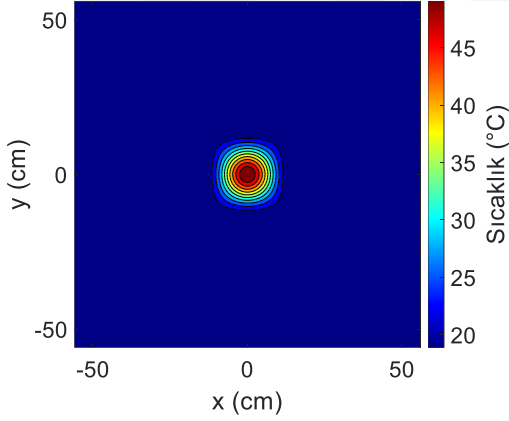
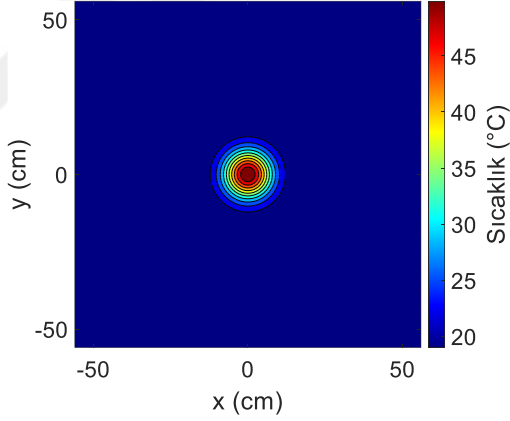
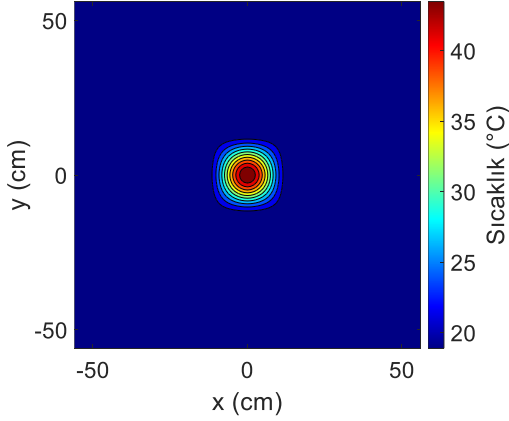
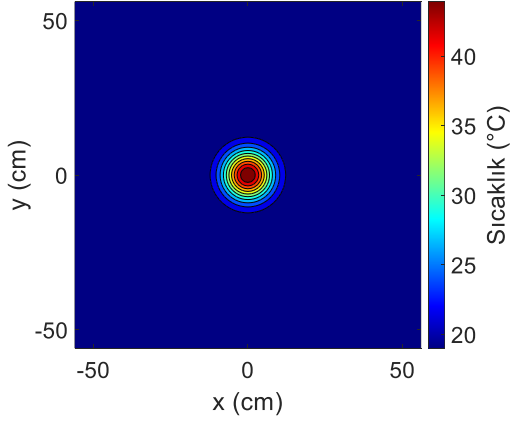
Fanlı ısıtıcının matematiksel modeli (52), (53) ve (54)'te elde edilen değişkenlerin (51)'de yerine yazılması ile (55)'teki gibi bulunmuştur.

$$T(x, y, z) = ka_4 + \frac{ka_1 - ka_4}{1 + \left(\frac{z}{ka_3}\right)^{ka_2}} \times e^{-\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{kc_4 + \frac{kc_1 - kc_4}{1 + \left(\frac{z}{kc_3}\right)^{kc_2}}}\right)^2} + T_a \quad (55)$$

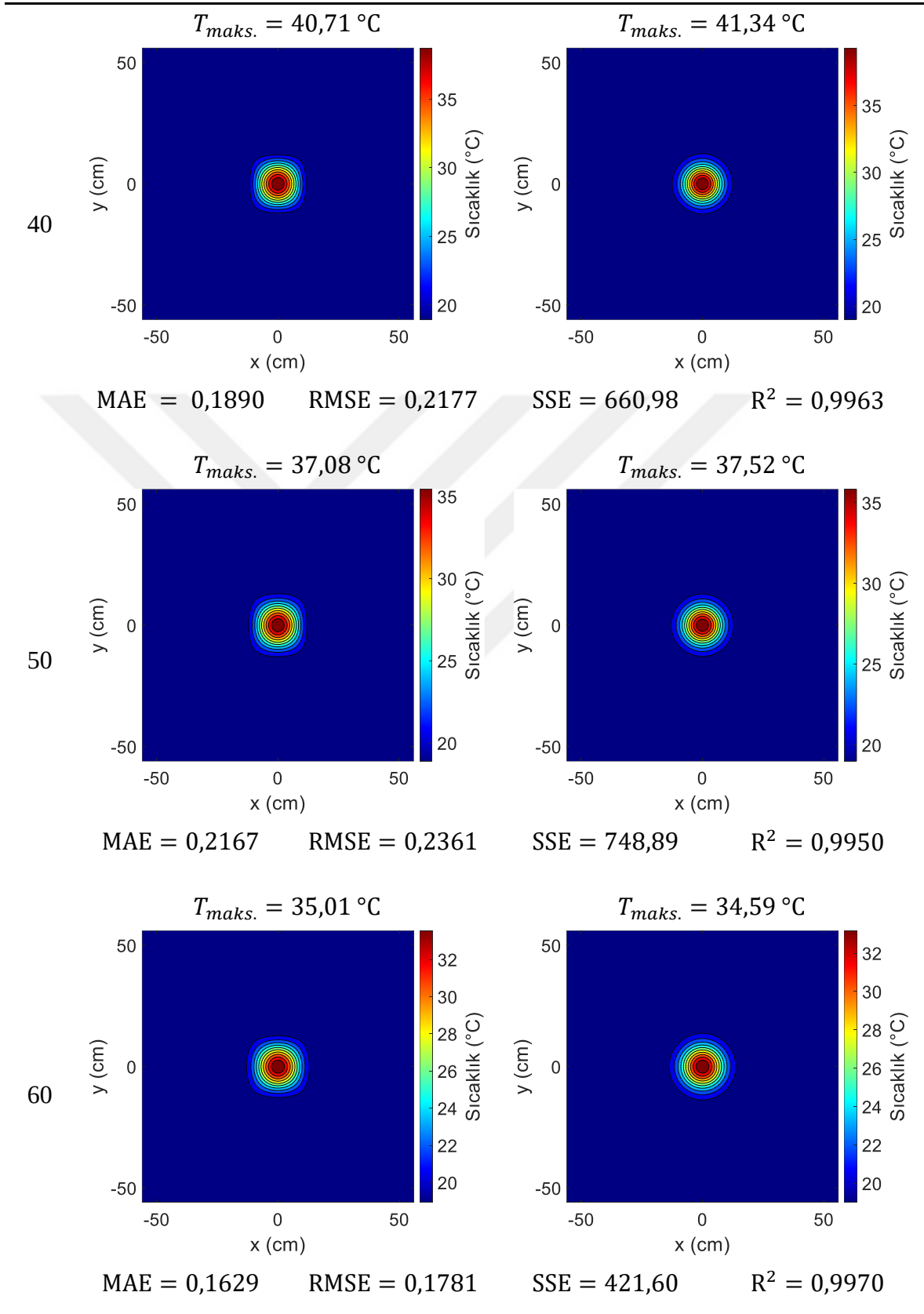
Burada $T(x, y, z)$ noktasal sıcaklık ve T_a ortam sıcaklığıdır. $T_a = 19^\circ\text{C}$ iken alınan ölçümler ile elde edilen matematiksel modele ait kontur grafikleri Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'te ayrıca sonuçlar hata tabanlı performans değerlendirme metrikleri (MAE, RMSE, SSE ve R^2) kullanılarak karşılaştırmış ve kontur grafiklerinin üzerinde ölçülen ve elde edilen maksimum sıcaklık değerleri ($T_{maks.}$) verilmiştir. Elde edilen 12 ölçüme ait hata değerlerinin ortalaması alındığında MAE = 0,1791 °C, RMSE = 0,2085 °C, SSE = 702,54 °C² ve $R^2 = \%99,21$ olarak bulunmuştur.

Matematiksel model elde edildikten sonra bir sonraki bölümde modelin doğruluğunu kanıtlayabilmek için dizilerden alınan ölçümler ile matematiksel model sonuçları karşılaştırılmıştır.

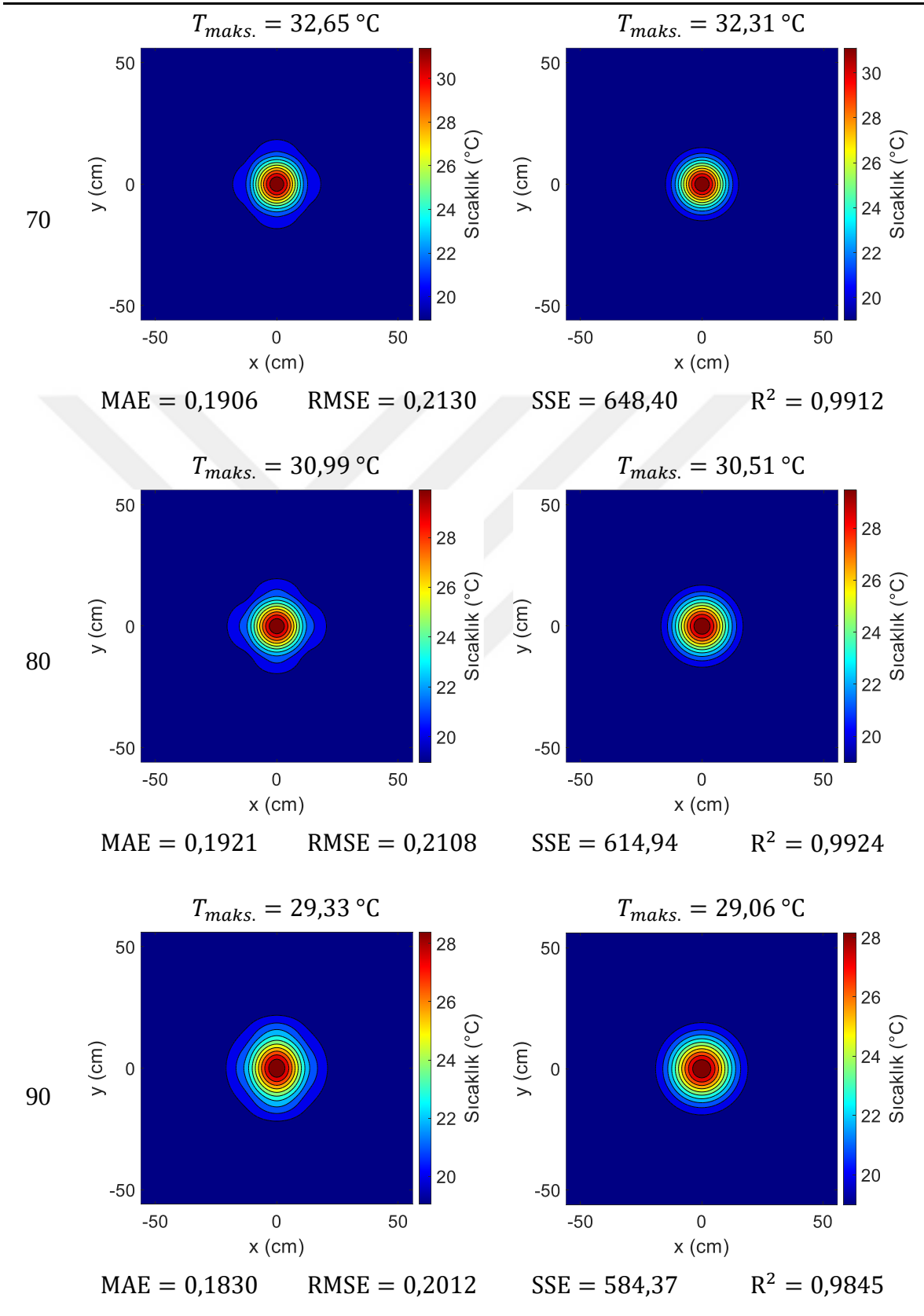
Tablo 5. Ölçüm sonuçları ile matematiksel modelin kıyaslanması

z (cm)	Ölçüm Sonuçları	Matematiksel Model Sonuçları
10	$T_{maks.} = 59,97\text{ }^{\circ}\text{C}$  MAE = 0,2570 RMSE = 0,3246	$T_{maks.} = 60,96\text{ }^{\circ}\text{C}$  SSE = 1827,36 $R^2 = 0,9942$
20	$T_{maks.} = 52,07\text{ }^{\circ}\text{C}$  MAE = 0,2090 RMSE = 0,2678	$T_{maks.} = 52,97\text{ }^{\circ}\text{C}$  SSE = 1160,18 $R^2 = 0,9954$
30	$T_{maks.} = 45,93\text{ }^{\circ}\text{C}$  MAE = 0,1622 RMSE = 0,2125	$T_{maks.} = 46,38\text{ }^{\circ}\text{C}$  SSE = 759,30 $R^2 = 0,9951$

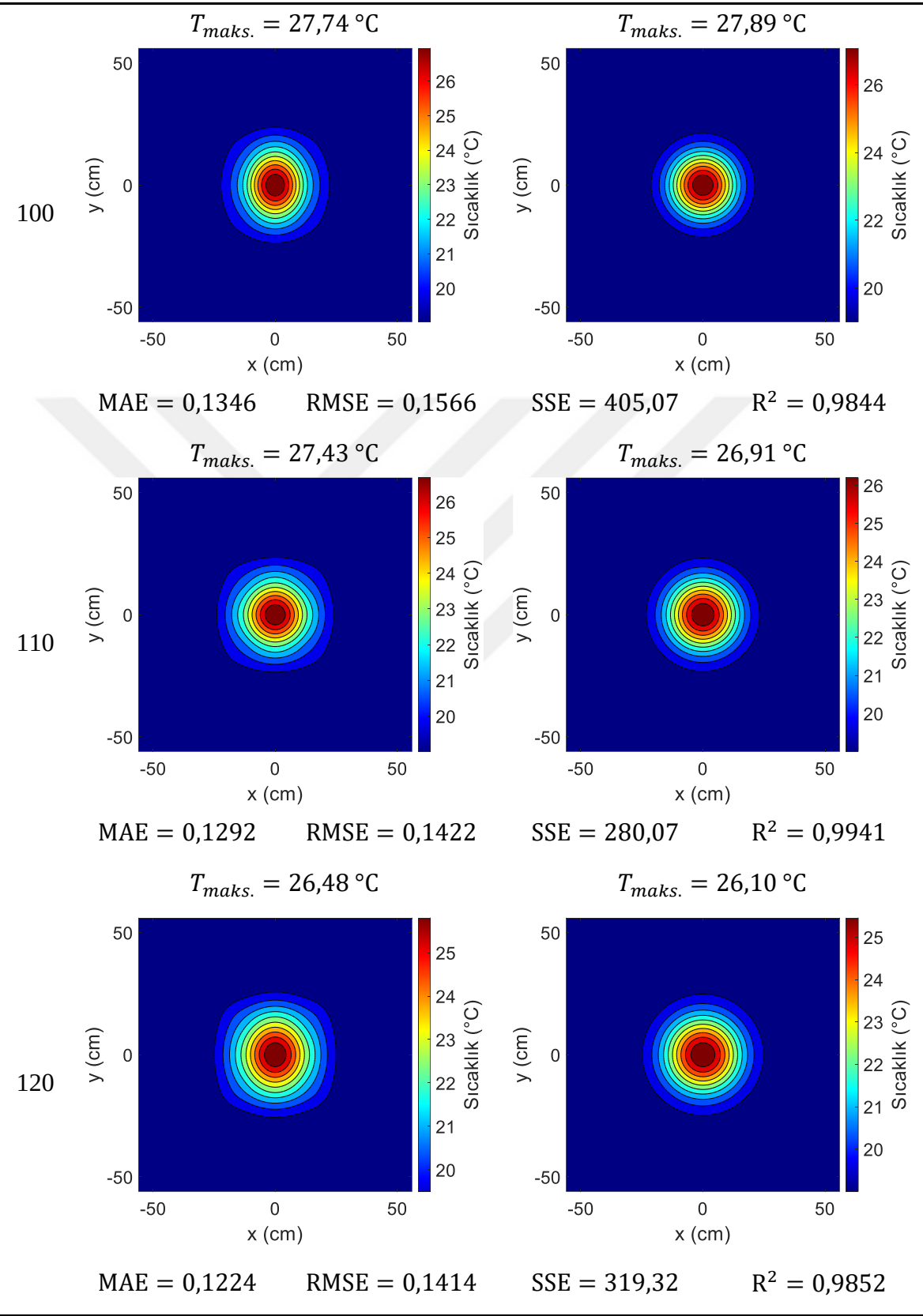
Tablo 5'in devamı



Tablo 5'in devamı



Tablo 5'in devamı

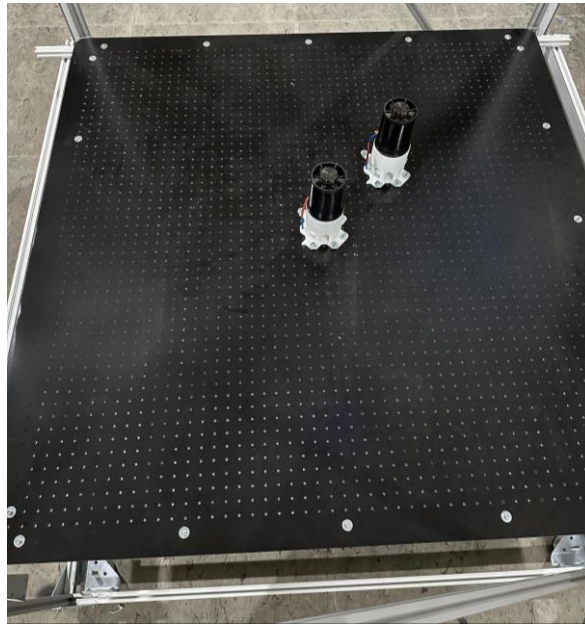


2.5. Dizi Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde fanlı ısıtıcılar ile ikili, üçlü, dördü, beşli ve altılı diziler oluşturularak ölçümler yapılmış ve sonuçlar matematiksel model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Her bir dizi için üç farklı ısıtıcı dizilimi seçilerek, ısıtıcılar ve algılayıcı dizisi arasındaki mesafe [10,120] cm arasında olacak şekilde 10 cm adım aralıkları ile ölçümler alınmıştır. Buna göre her bir dizi için 12 ölçüm olacak şekilde toplamda 180 ölçüm yapılmıştır. Ölçüm sonuçları ile matematiksel modeller MAE ve R^2 performans değerlendirme kriterleri açısından karşılaştırılarak sonuçlar tablo olarak verilmiştir. Ölçüm sonuçları [20,120] cm arasında 20 cm adım aralığında her bir dizi için altı adet olacak şekilde sunulmuş ve tüm ölçüm sonuçları ise toplu olarak EK-1'deki tabloya eklenmiştir.

2.5.1. İki Isıtıcılı Diziler

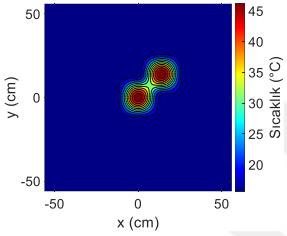
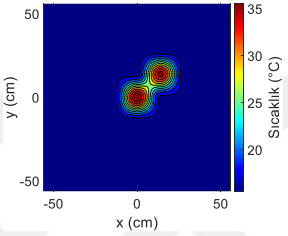
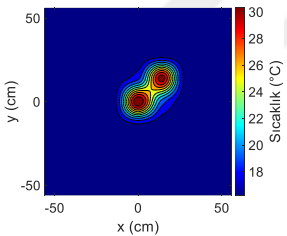
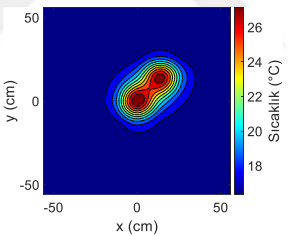
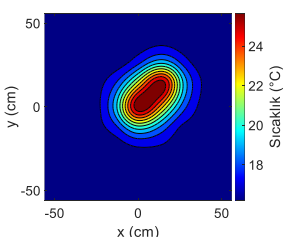
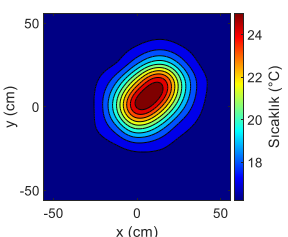
İki ısıtıcılı dizi için oluşturulan ilk modelin koordinatları birinci ısıtıcı (0,0) ve ikinci ısıtıcı (14,14) olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı 16,73 °C olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki görünümü Şekil 31'de verilmiştir.



Şekil 31. İki ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 6'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde gerçekleştirilen ölçüm ve matematiksel model sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Tablo 6'da matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki ortalama mutlak hata (MAE) ve uyumluluk (R^2) değerleri sunulmuştur.

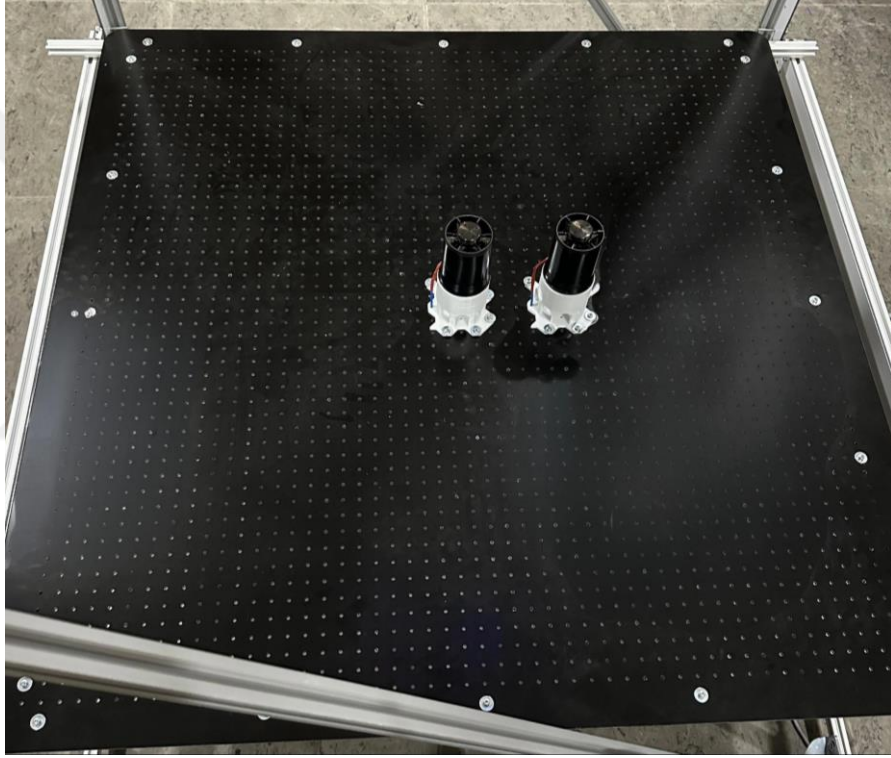
Tablo 6. İki ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm  MAE = 0,2880, $R^2 = 0,9920$		40 cm  MAE = 0,2509, $R^2 = 0,9853$	
60 cm  MAE = 0,1780, $R^2 = 0,9885$		80 cm  MAE = 0,1512, $R^2 = 0,9883$	
100 cm  MAE = 0,1660, $R^2 = 0,9874$		120 cm  MAE = 0,1262, $R^2 = 0,9925$	

Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,1262 °C ve 0,3419 °C olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda iki modelin birbirine uyumluluğunu gösteren R^2 hata metriğinin en küçük ve en büyük değerleri sırasıyla %98,35 ve %99,36

olarak bulunmuştur. Bu dizide ölçüm sonuçları ve matematiksel model arasında oluşan maksimum sıcaklık farkı $2,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. İki ısıtıcılı birinci dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla $0,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\%98,94$ olarak bulunmuştur.

İki ısıtıcılı dizi için oluşturulan ikinci modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(0, 0)$ ve ikinci ısıtıcı $(14, 0)$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı $16,23\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 32'de görülmektedir.

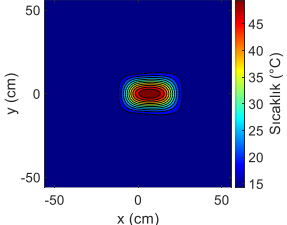
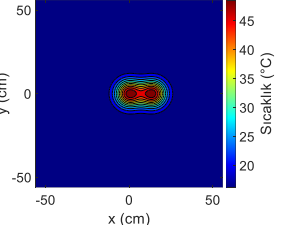
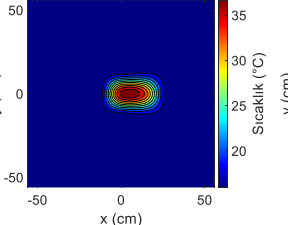
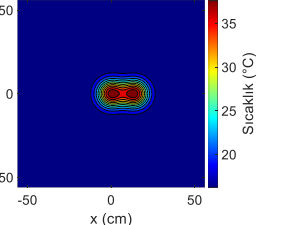
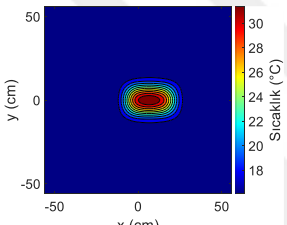
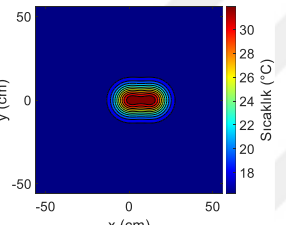
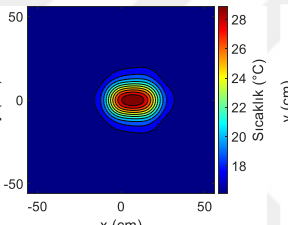
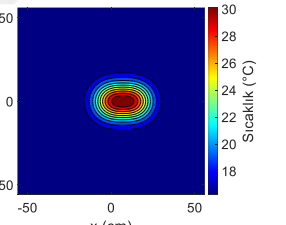
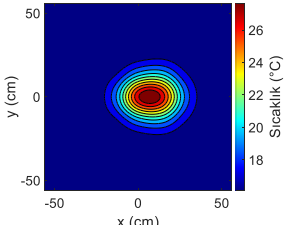
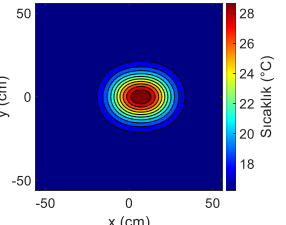
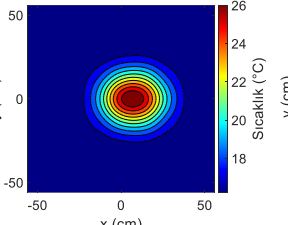
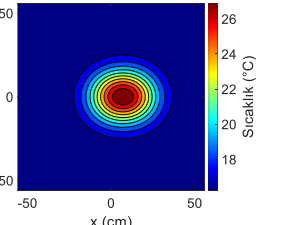


Şekil 32. İki ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'de matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri sunulmuştur.

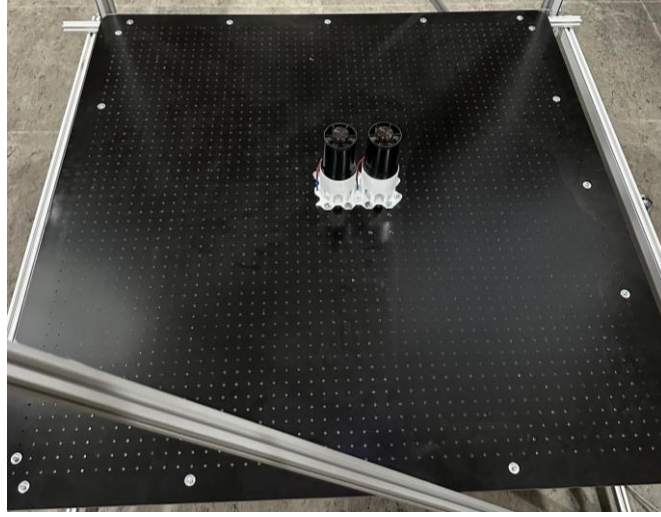
Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla $0,1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $0,3834\text{ }^{\circ}\text{C}$, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla $\%98,06$ ve $\%99,21$ olarak hesaplanmıştır. Dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında görülen maksimum sıcaklık farkı $1,73\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. İki ısıtıcılı ikinci dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla $0,22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\%98,68$ olarak bulunmuştur.

Tablo 7. İki ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
			
MAE = 0,3802, $R^2 = 0,9809$		MAE = 0,2787, $R^2 = 0,9806$	
60 cm		80 cm	
			
MAE = 0,2226, $R^2 = 0,9872$		MAE = 0,1508, $R^2 = 0,9872$	
100 cm		120 cm	
			
MAE = 0,1276, $R^2 = 0,9885$		MAE = 0,1100, $R^2 = 0,9919$	

İki ısıtıcılı dizi için oluşturulan üçüncü modelin koordinatları birinci ısıtıcı (0, 0) ve ikinci ısıtıcı (8, 0) olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı 16,40 °C olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 33'te verilmiştir.

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8'de ayrıca matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri sunulmuştur.



Şekil 33. İki ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

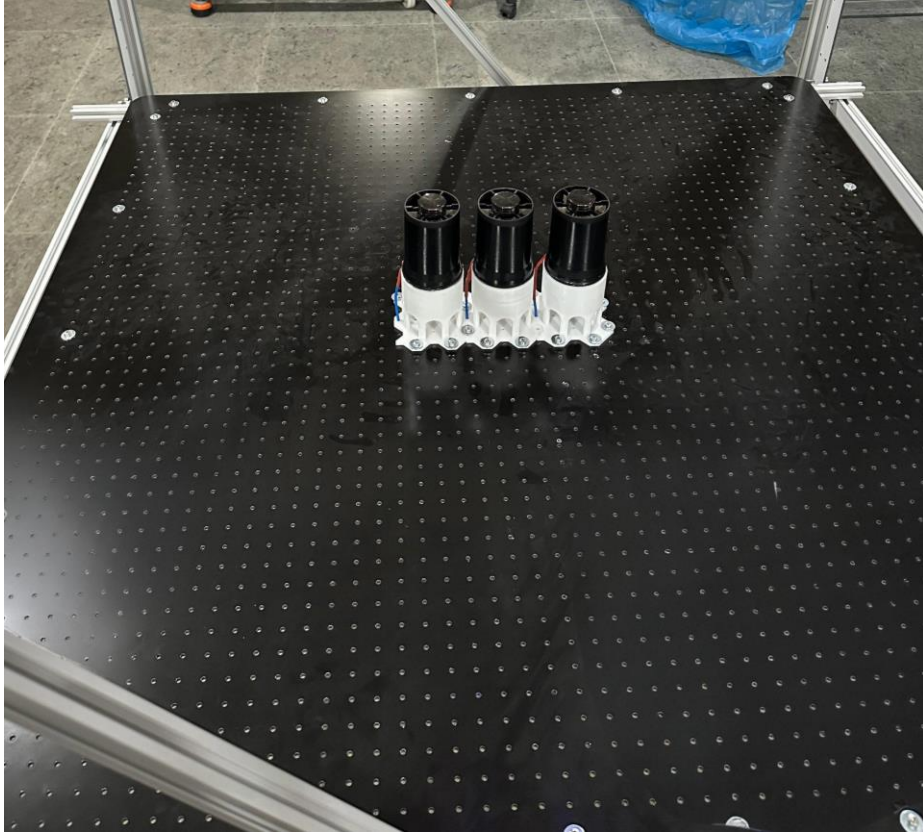
Tablo 8. İki ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
MAE = 0,2416, $R^2 = 0,9798$		MAE = 0,1506, $R^2 = 0,9897$	
60 cm		80 cm	
MAE = 0,1430, $R^2 = 0,9893$		MAE = 0,1594, $R^2 = 0,9858$	
100 cm		120 cm	
MAE = 0,1672, $R^2 = 0,9815$		MAE = 0,2200, $R^2 = 0,9686$	

Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,1417 °C ve 0,3242 °C, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla %97,43 ve %99,24 olarak hesaplanmıştır. Bu dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasındaki en yüksek sıcaklık farkı 1,25 °C'dir. İki ısıtıcılı üçüncü dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla 0,19 °C ve %98,33 olarak bulunmuştur.

2.5.2. Üç Isıtıcılı Diziler

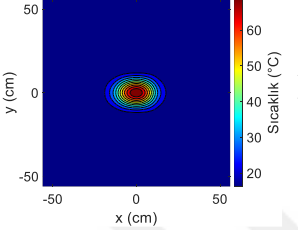
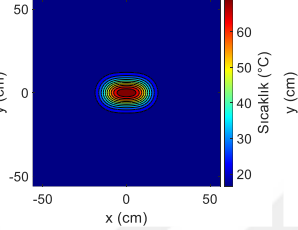
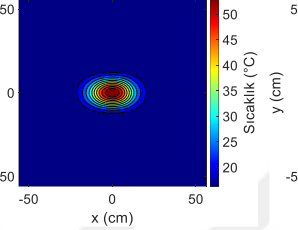
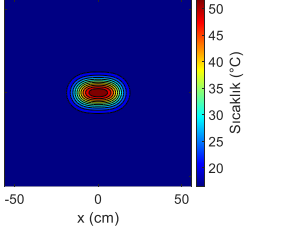
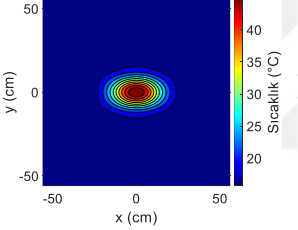
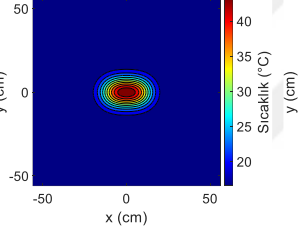
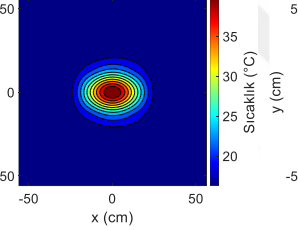
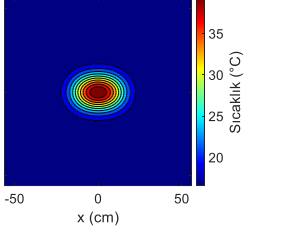
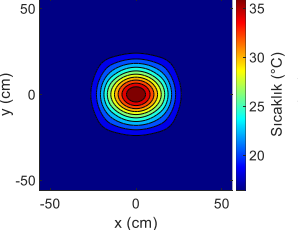
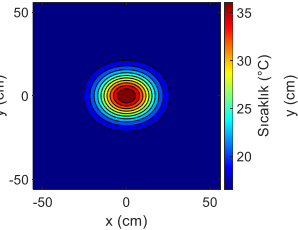
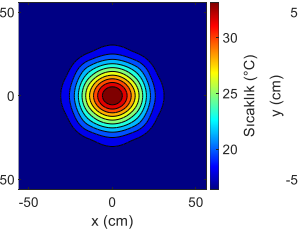
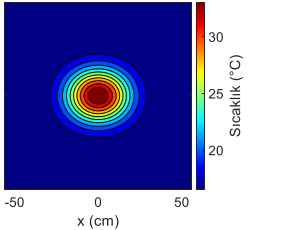
Üç ısıtıcılı dizi için oluşturulan ilk modelin koordinatları birinci ısıtıcı (−8, 0), ikinci ısıtıcı (0, 0) ve üçüncü ısıtıcı (8, 0) olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı 16,54 °C ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 34'te görülmektedir.



Şekil 34. Üç ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

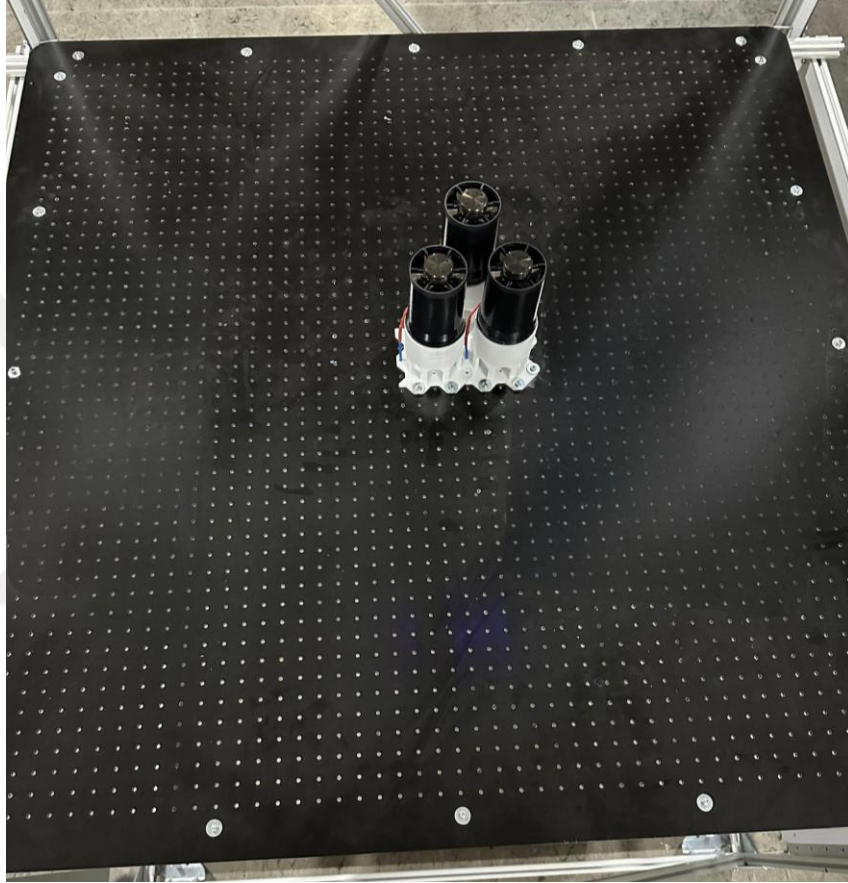
Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 9'da verilmiştir. Ayrıca Tablo 9'da matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri de sunulmuştur.

Tablo 9. Üç ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
			
MAE = 0,3011, $R^2 = 0,9820$		MAE = 0,1861, $R^2 = 0,9962$	
60 cm		80 cm	
			
MAE = 0,2358, $R^2 = 0,9932$		MAE = 0,2864, $R^2 = 0,9825$	
100 cm		120 cm	
			
MAE = 0,2545, $R^2 = 0,9809$		MAE = 0,3291, $R^2 = 0,9625$	

Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,1689 °C ve 0,5627 °C, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla %96,25 ve %99,62 olarak hesaplanmıştır. Dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında görülen en yüksek sıcaklık farkı 2,11 °C'dir. Üç ısıtıcılı birinci dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla 0,29 °C ve %98,43 olarak bulunmuştur.

Üç ısıtıcı dizi için oluşturulan ikinci modelin koordinatları birinci ısıtıcı (0, 0), ikinci ısıtıcı (8, 0) ve üçüncü ısıtıcı (4, 8) olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı 16,58 °C olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 35’te görülmektedir.

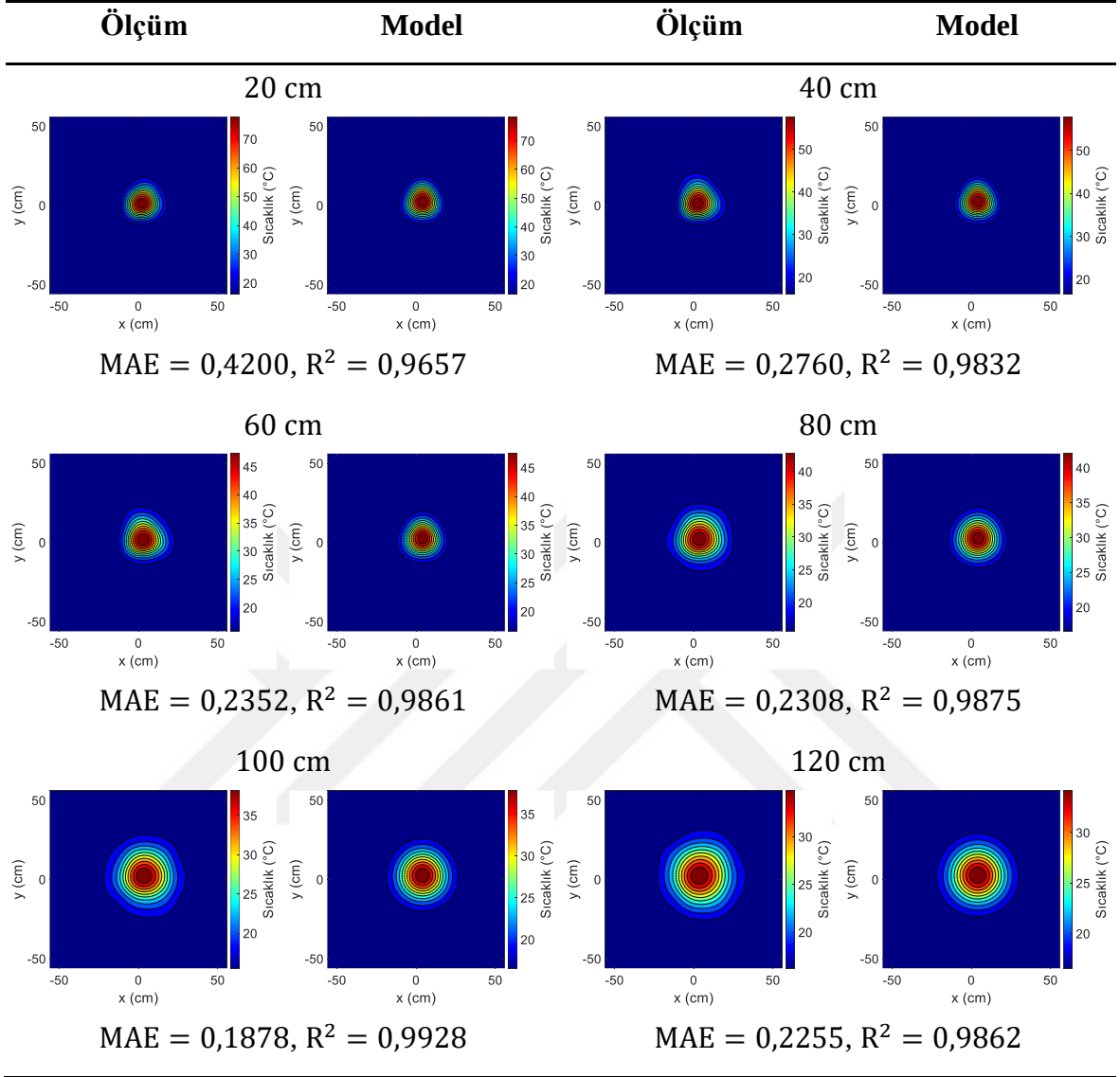


Şekil 35. Üç ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 10’da sunulmuştur. Ayrıca Tablo 10’da matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri verilmiştir.

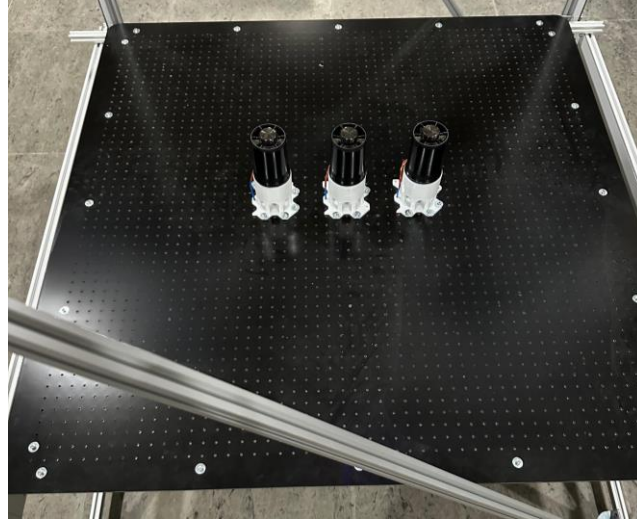
Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,1878 °C ve 0,5403 °C, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla %95,99 ve %99,28 olarak hesaplanmıştır. Bu dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında görülen en yüksek sıcaklık farkı 1,20 °C’dir. Üç ısıtıcı dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla 0,28 °C ve %98,29 olarak bulunmuştur.

Tablo 10. Üç ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm ve model sonuçları



Üç ısıtıcılı dizi için oluşturulan üçüncü modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-14, 0)$, ikinci ısıtıcı $(0, 0)$ ve üçüncü ısıtıcı $(14, 0)$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı $17,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 36’da görülmektedir.

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 11’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, gerçekleştirilen ölçüm sonuçları ile matematiksel modellerin birbirleri ile uyumlu olduğu kontur grafiklerinden açıkça görülmektedir. Tablo 11’de matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri sunulmuştur.



Şekil 36. Üç ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

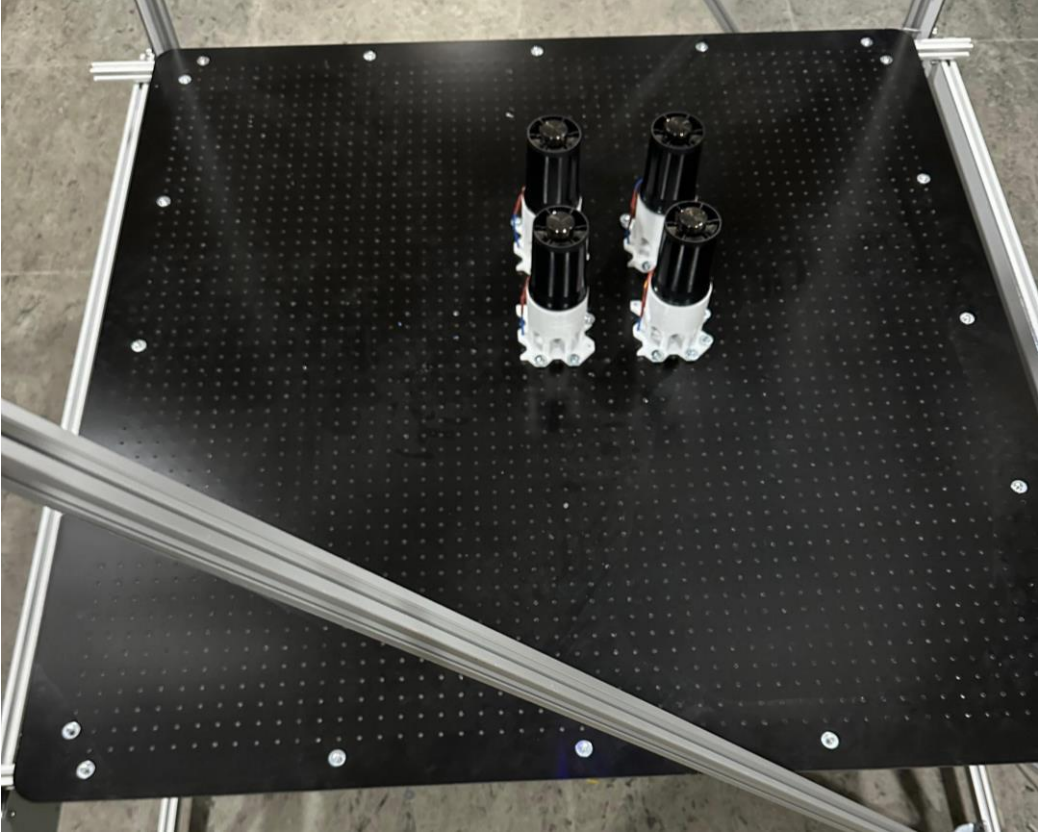
Tablo 11. Üç ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
MAE = 0,5686, R ² = 0,9905		MAE = 0,4809, R ² = 0,9906	
60 cm		80 cm	
MAE = 0,3498, R ² = 0,9933		MAE = 0,4047, R ² = 0,9832	
100 cm		120 cm	
MAE = 0,4258, R ² = 0,9779		MAE = 0,3813, R ² = 0,9786	

Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,3498 °C ve 0,6405 °C, en küçük ve en büyük R^2 ise değerleri sırasıyla %97,62 ve %99,42 olarak hesaplanmıştır. Dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında görülen en yüksek sıcaklık farkı 2,00 °C'dir. Üç ısıtıcılı üçüncü dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla 0,45 °C ve %98,63 olarak bulunmuştur. Tüm diziler içerisinde MAE değerinin en yüksek ortalamaya sahip olduğu sonuç bu dizide kaydedilmiştir.

2.5.3. Dört Isıtıcılı Diziler

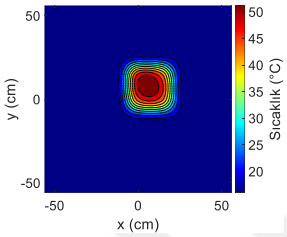
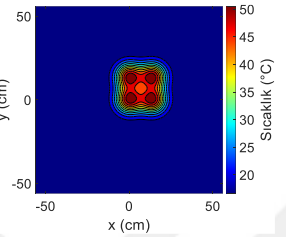
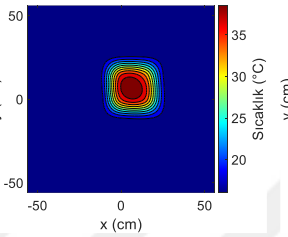
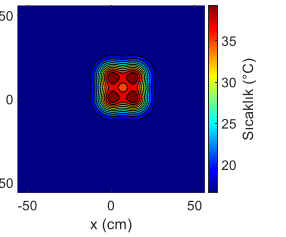
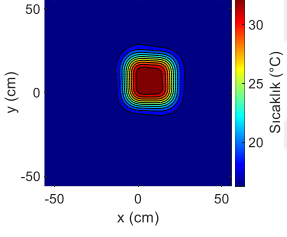
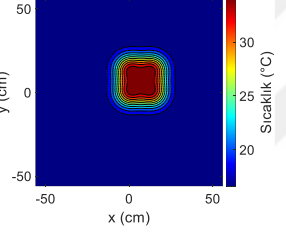
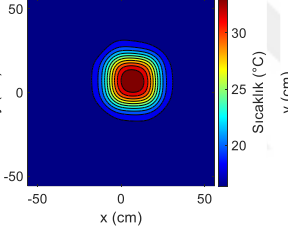
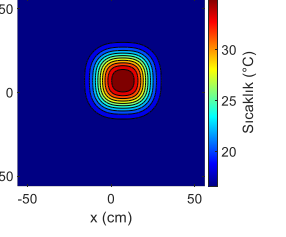
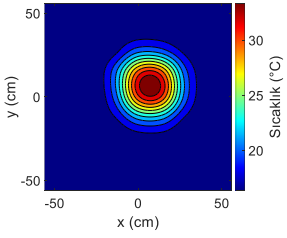
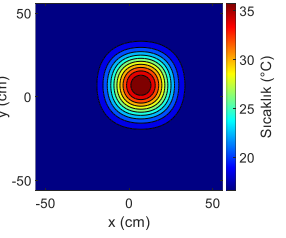
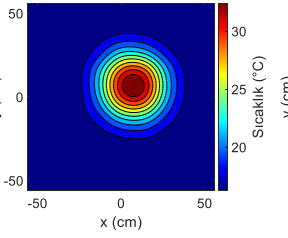
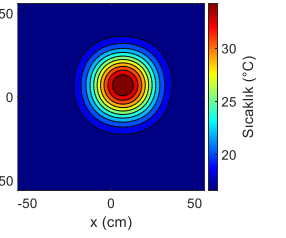
Dört ısıtıcılı dizi için oluşturulan ilk modelin koordinatları birinci ısıtıcı (0, 0), ikinci ısıtıcı (14, 0) üçüncü ısıtıcı (0, 14) ve dördüncü ısıtıcı (14, 14) olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı 16,62 °C olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 37'de görülmektedir.



Şekil 37. Dört ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 12’de verilmiştir. Tablo 12’de matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri sunulmuştur.

Tablo 12. Dört ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
			
MAE = 0,4469, $R^2 = 0,9685$		MAE = 0,3807, $R^2 = 0,9624$	
60 cm		80 cm	
			
MAE = 0,2534, $R^2 = 0,9751$		MAE = 0,1957, $R^2 = 0,9821$	
100 cm		120 cm	
			
MAE = 0,2140, $R^2 = 0,9798$		MAE = 0,1734, $R^2 = 0,9876$	

Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,1734 °C ve 0,5146 °C, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla %96,08 ve %98,76 olarak hesaplanmıştır. Bu dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında oluşan en yüksek sıcaklık farkı 2,65 °C’dir. Dört ısıtıcılı birinci dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla 0,30 °C ve %97,49 olarak hesaplanmıştır.

Dört ısıtıcı dizi için oluşturulan ikinci modelin koordinatları birinci ısıtıcı (0, 0), ikinci ısıtıcı (8, 0) üçüncü ısıtıcı (0, 8) ve dördüncü ısıtıcı (8, 8) olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı 16,72 °C olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 38’de görülmektedir.

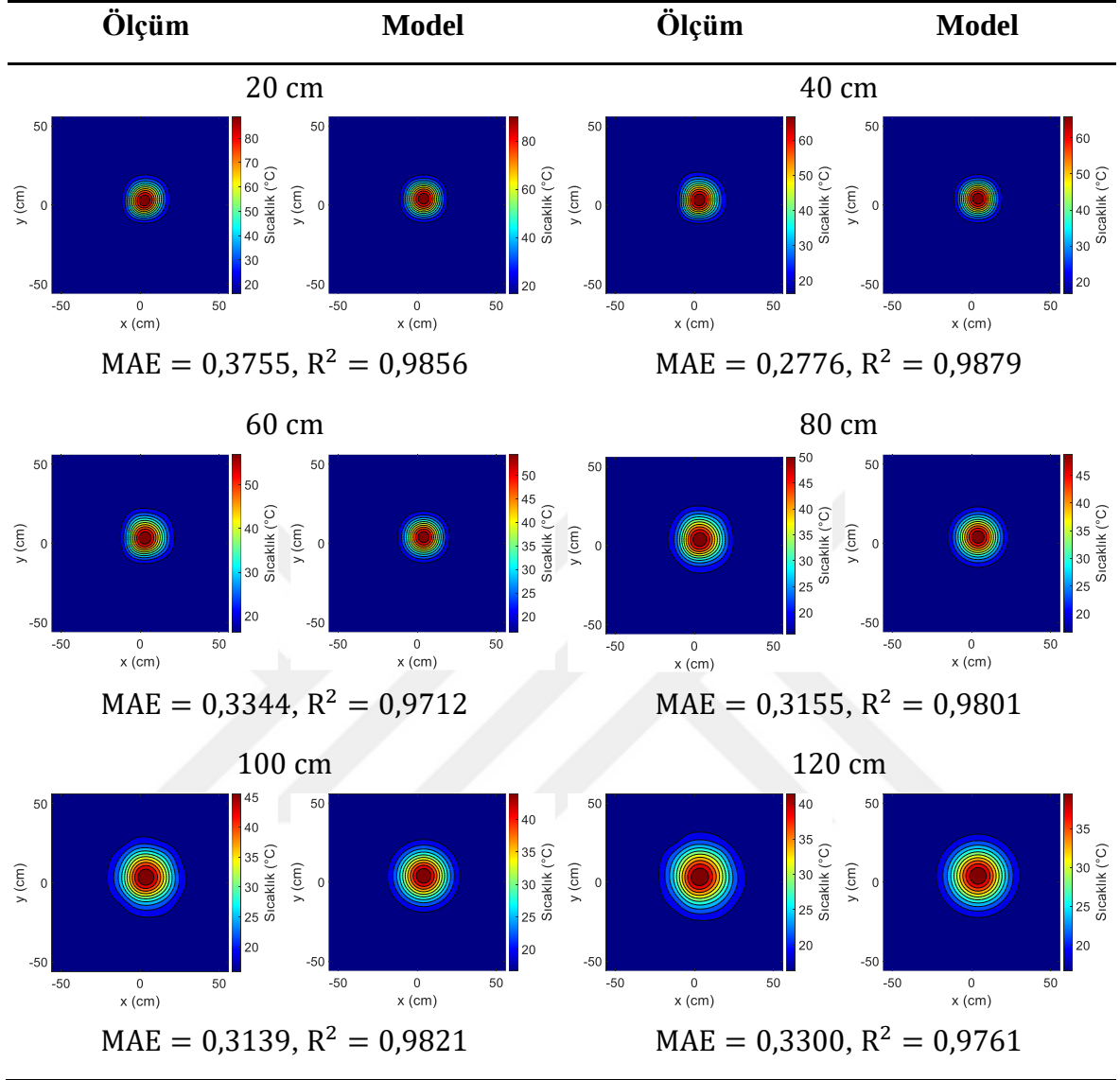


Şekil 38. Dört ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 13’te verilmiştir. Ayrıca Tablo 13’te matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri de sunulmuştur.

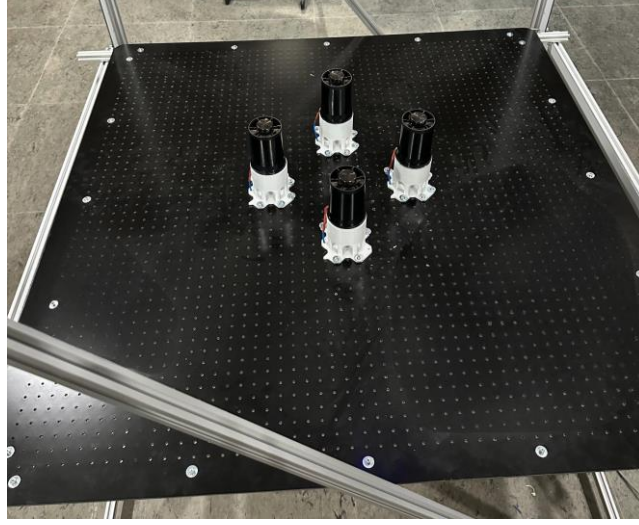
Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,2776 °C ve 0,4892 °C, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla %97,12 ve %99,04 olarak hesaplanmıştır. Dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında görülen en yüksek sıcaklık farkı 2,78 °C’dır. Dört ısıtıcı dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla 0,33 °C ve %98,08 olarak bulunmuştur.

Tablo 13. Dört ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm ve model sonuçları



Dört ısıtıcılı dizi için oluşturulan üçüncü modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-14, 0)$, ikinci ısıtıcı $(14, 0)$ üçüncü ısıtıcı $(0, 14)$ ve dördüncü ısıtıcı $(0, -14)$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı $16,56^\circ\text{C}$ olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 39’da görülmektedir.

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 14’te verilmiştir. Elde edilen grafikler ölçüm sonuçları ve matematiksel modelin birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu durum ölçüm sisteminin kararlılığı ve matematiksel modelin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir. Tablo 14’te matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri sunulmuştur.



Şekil 39. Dört ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

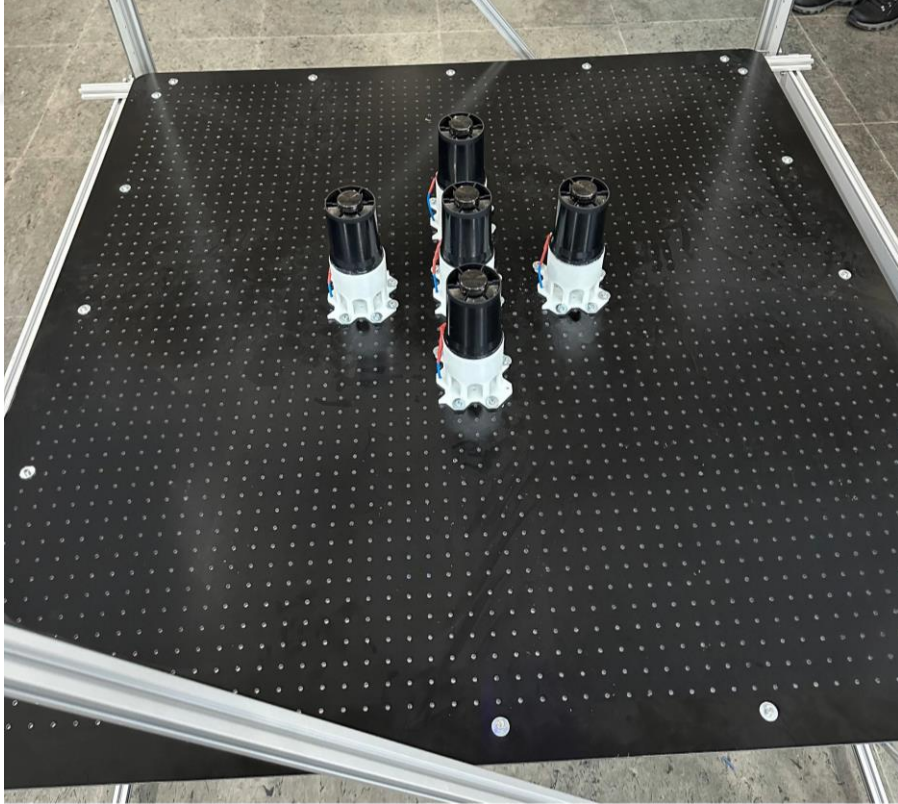
Tablo 14. Dört ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
MAE = 0,3319, $R^2 = 0,9862$		MAE = 0,3426, $R^2 = 0,9759$	
60 cm		80 cm	
MAE = 0,2370, $R^2 = 0,9704$		MAE = 0,1574, $R^2 = 0,9888$	
100 cm		120 cm	
MAE = 0,2116, $R^2 = 0,9759$		MAE = 0,2396, $R^2 = 0,9645$	

Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,1574 °C ve 0,3820 °C, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla %96,45 ve %98,88 olarak hesaplanmıştır. Dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında görülen en yüksek sıcaklık farkı 1,92 °C'dir. Dört ısıtıcılı üçüncü dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla 0,26 °C ve %97,87 olarak bulunmuştur.

2.5.4. Beş Isıtıcılı Diziler

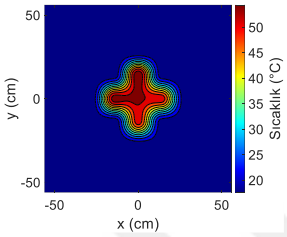
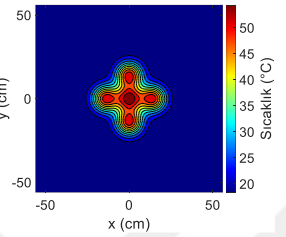
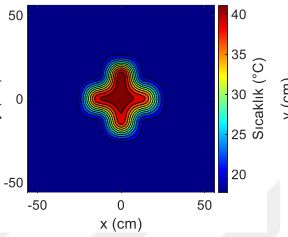
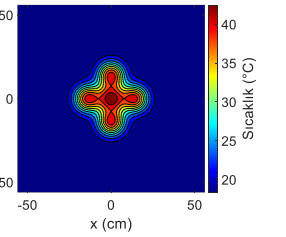
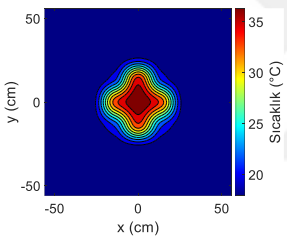
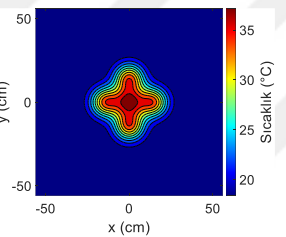
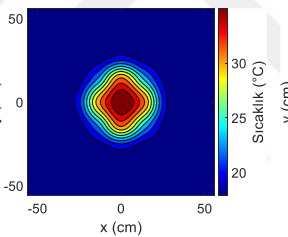
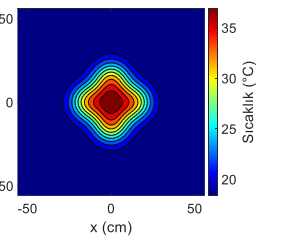
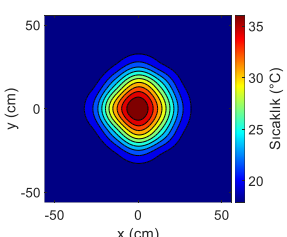
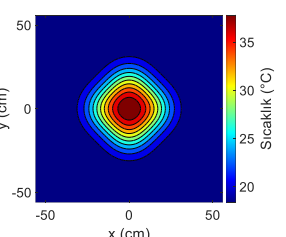
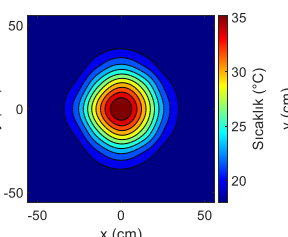
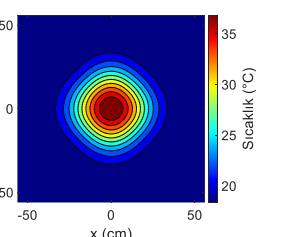
Beş ısıtıcılı dizi için oluşturulan ilk modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-14, 0)$, ikinci ısıtıcı $(0, 0)$ üçüncü ısıtıcı $(14, 0)$ dördüncü ısıtıcı $(0, 14)$ ve beşinci ısıtıcı $(0, -14)$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı 18,37 °C olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 40'ta görülmektedir.



Şekil 40. Beş ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

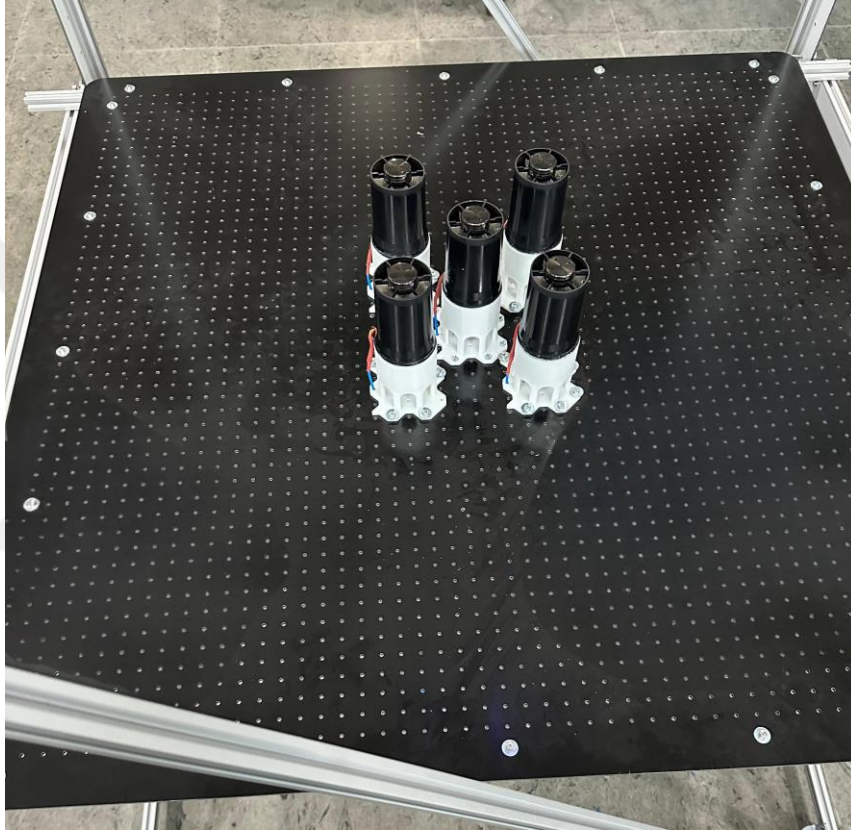
Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 15'te verilmiştir. Tablo 15'te matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri de sunulmuştur.

Tablo 15. Beş ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
			
MAE = 0,5857, $R^2 = 0,9735$		MAE = 0,3626, $R^2 = 0,9879$	
60 cm		80 cm	
			
MAE = 0,2900, $R^2 = 0,9930$		MAE = 0,3613, $R^2 = 0,9826$	
100 cm		120 cm	
			
MAE = 0,3220, $R^2 = 0,9853$		MAE = 0,3052, $R^2 = 0,9840$	

Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,2900 °C ve 0,7110 °C, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla %97,31 ve %99,30 olarak hesaplanmıştır. Bu dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında oluşan en yüksek sıcaklık farkı 2,05 °C'dir. Beş ısıtıcılı birinci dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla 0,39 °C ve %98,47 olarak bulunmuştur.

Beş ısıtıcı dizi için oluşturulan ikinci modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-8, -8)$, ikinci ısıtıcı $(8, -8)$ üçüncü ısıtıcı $(0, 0)$ dördüncü ısıtıcı $(-8, 8)$ ve beşinci ısıtıcı $(8, 8)$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı $18,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 41’de görülmektedir.

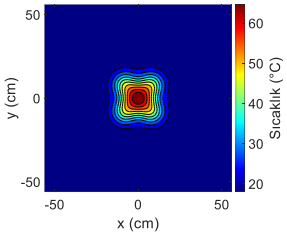
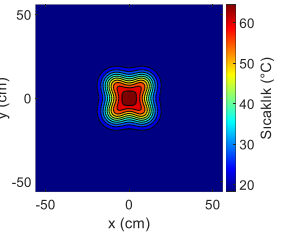
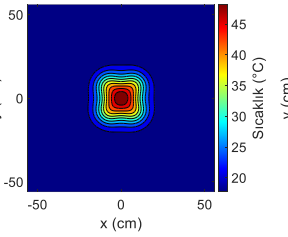
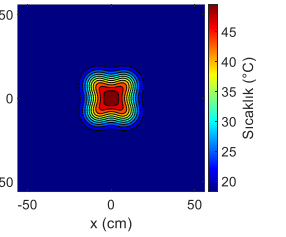
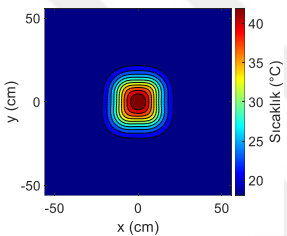
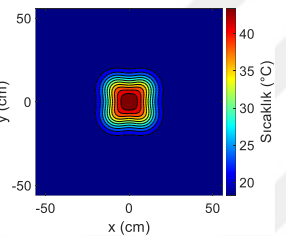
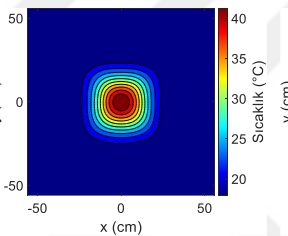
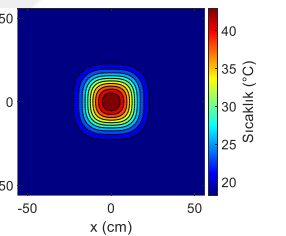
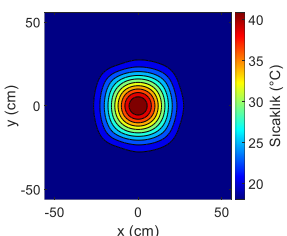
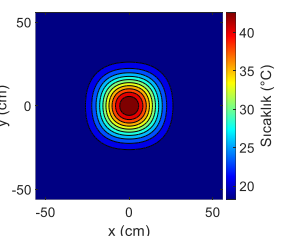
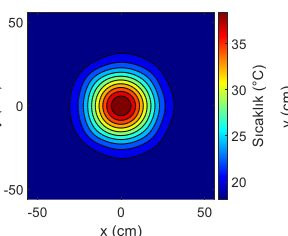
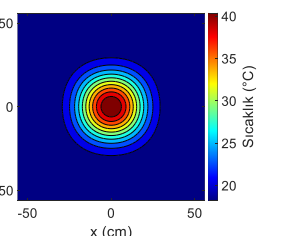


Şekil 41. Beş ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 16’da verilmiştir. Tablo 16’da matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri de sunulmuştur.

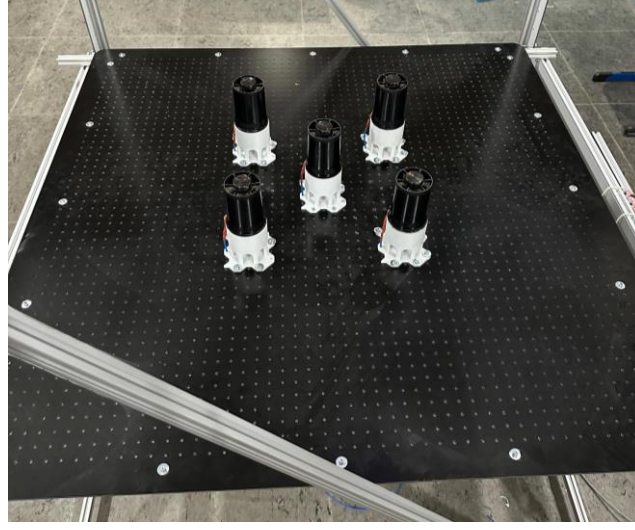
Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla $0,1813\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $0,7263\text{ }^{\circ}\text{C}$, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla $\%95,67$ ve $\%99,08$ olarak hesaplanmıştır. Dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında görülen en yüksek sıcaklık farkı $2,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’dir. Beş ısıtıcı dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla $0,32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\%97,92$ olarak bulunmuştur.

Tablo 16. Beş ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
			
MAE = 0,5680, $R^2 = 0,9593$		MAE = 0,3398, $R^2 = 0,9720$	
60 cm		80 cm	
			
MAE = 0,2465, $R^2 = 0,9852$		MAE = 0,2241, $R^2 = 0,9877$	
100 cm		120 cm	
			
MAE = 0,1813, $R^2 = 0,9908$		MAE = 0,2261, $R^2 = 0,9862$	

Beş ısıtıcı dizisi için oluşturulan üçüncü modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-14, -14)$, ikinci ısıtıcı $(14, -14)$ üçüncü ısıtıcı $(0, 0)$ dördüncü ısıtıcı $(-14, 14)$ ve beşinci ısıtıcı $(14, 14)$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı $18,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 42’de görülmektedir.

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 17’de verilmiştir. Tabloda ayrıca matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri de sunulmuştur.



Şekil 42. Beş ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

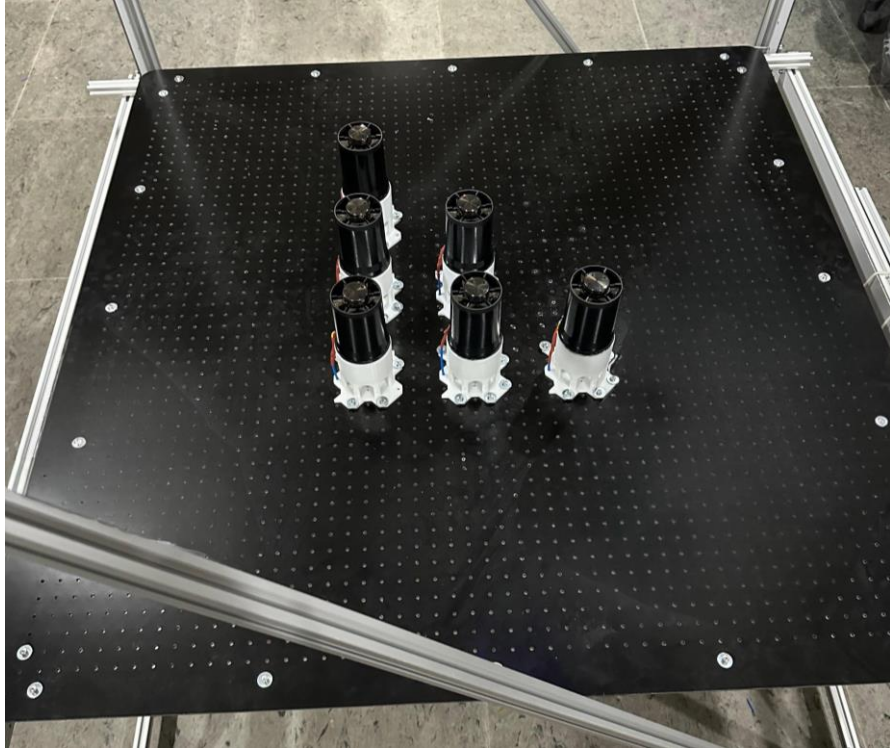
Tablo 17. Beş ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
MAE = 0,3761, $R^2 = 0,9849$		MAE = 0,3369, $R^2 = 0,9683$	
60 cm		80 cm	
MAE = 0,3719, $R^2 = 0,9507$		MAE = 0,2657, $R^2 = 0,9754$	
100 cm		120 cm	
MAE = 0,2965, $R^2 = 0,9725$		MAE = 0,3277, $R^2 = 0,9627$	

Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,2493 °C ve 0,4596 °C, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla %95,07 ve %98,49 olarak hesaplanmıştır. Tüm sonuçlar içerisinde en küçük R^2 değeri bu dizide $z = 60$ cm olduğunda görülmüştür. Kontur grafiği incelenecek olursa bu durumun grafiğin tepe noktalarında görülen sıcaklık farklarından oluştuğu anlaşılmaktadır. Dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasındaki en yüksek sıcaklık farkı 1,98 °C'dir. Beş ısıtıcılı üçüncü dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla 0,33 °C ve %97,06 olarak bulunmuştur.

2.5.5. Altı Isıtıcılı Diziler

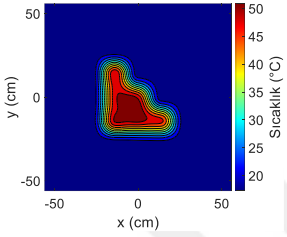
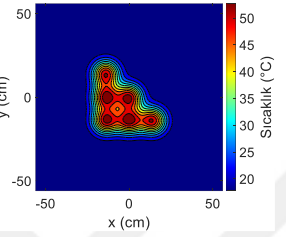
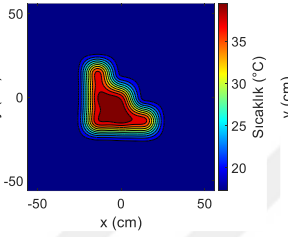
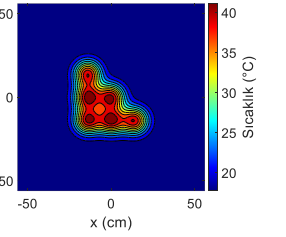
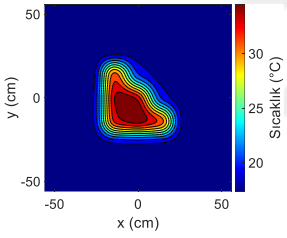
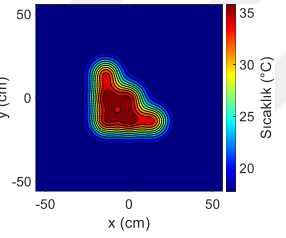
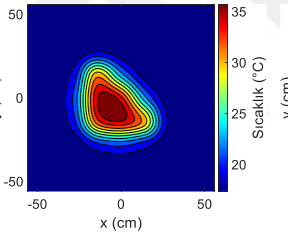
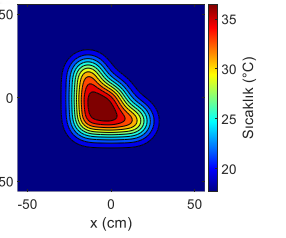
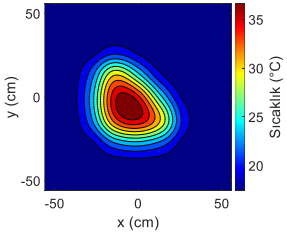
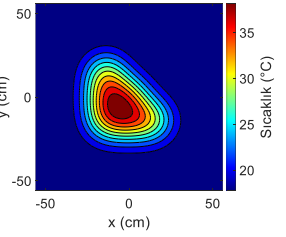
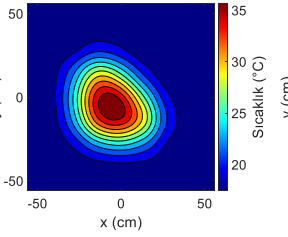
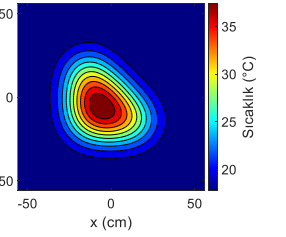
Altı ısıtıcılı dizi için oluşturulan ilk modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-14, -14)$, ikinci ısıtıcı $(0, -14)$, üçüncü ısıtıcı $(14, -14)$, dördüncü ısıtıcı $(-14, 0)$, beşinci ısıtıcı $(0, 0)$ ve altıncı ısıtıcı $(-14, 14)$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı 17,75 °C olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 43'te görülmektedir.



Şekil 43. Altı ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 18’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 18’de matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri de sunulmuştur.

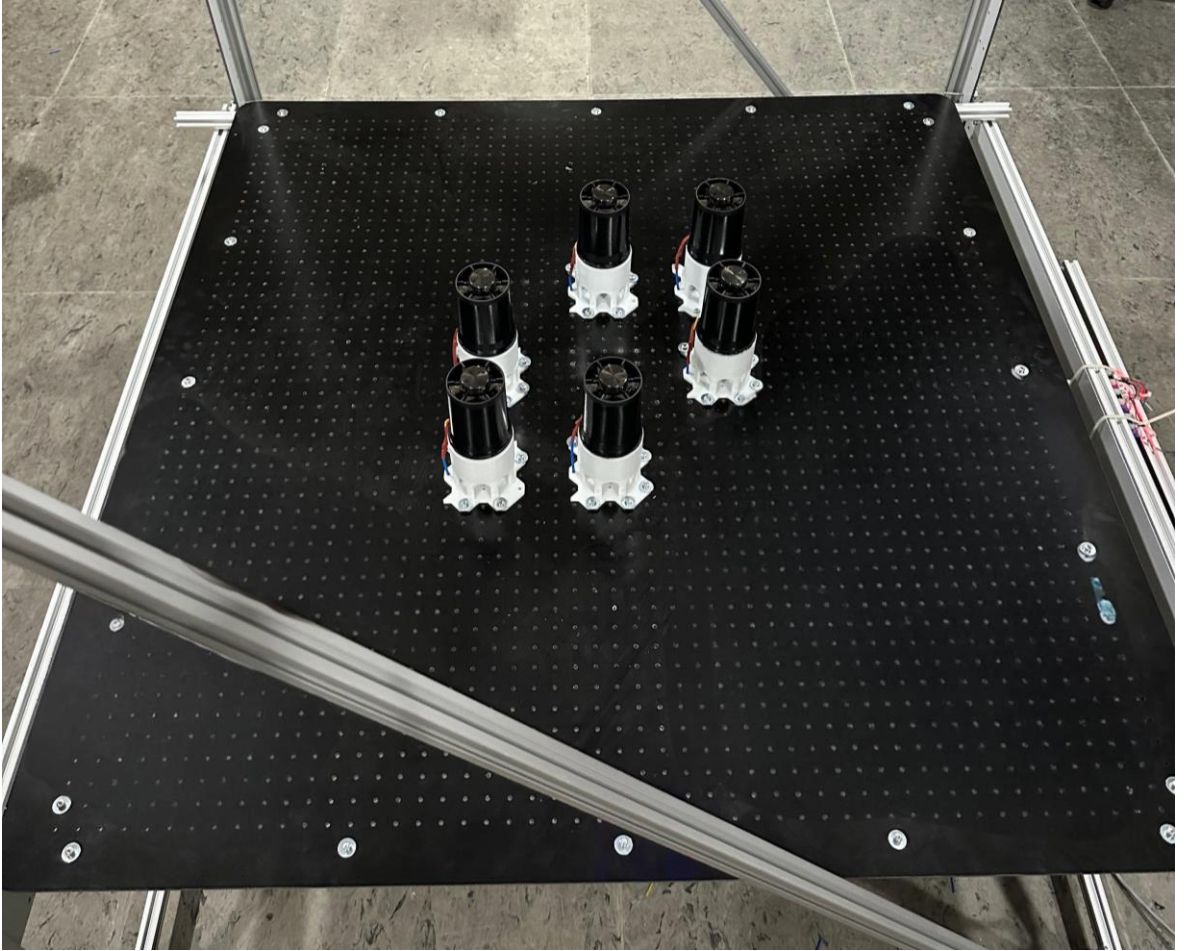
Tablo 18. Altı ısıtıcıdan oluşan birinci dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
			
MAE = 0,4004, $R^2 = 0,9866$		MAE = 0,3074, $R^2 = 0,9866$	
60 cm		80 cm	
			
MAE = 0,3368, $R^2 = 0,9797$		MAE = 0,2327, $R^2 = 0,9950$	
100 cm		120 cm	
			
MAE = 0,2454, $R^2 = 0,9929$		MAE = 0,2644, $R^2 = 0,9895$	

Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,2327 °C ve 0,5409 °C, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla %96,77 ve %99,50 olarak hesaplanmıştır. Dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında oluşan en yüksek

sıcaklık farkı $1,97\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Altı ısıtıcı birinci dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla $0,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\%98,62$ olarak bulunmuştur.

Altı ısıtıcı dizi için oluşturulan ikinci modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-14, -14)$, ikinci ısıtıcı $(0, -14)$, üçüncü ısıtıcı $(-14, 0)$, dördüncü ısıtıcı $(14, 0)$, beşinci ısıtıcı $(0, 14)$ ve altıncı ısıtıcı $(14, 14)$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı $17,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 44'te görülmektedir.



Şekil 44. Altı ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 19'da verilmiştir. Tablo 19'da matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri de sunulmuştur.

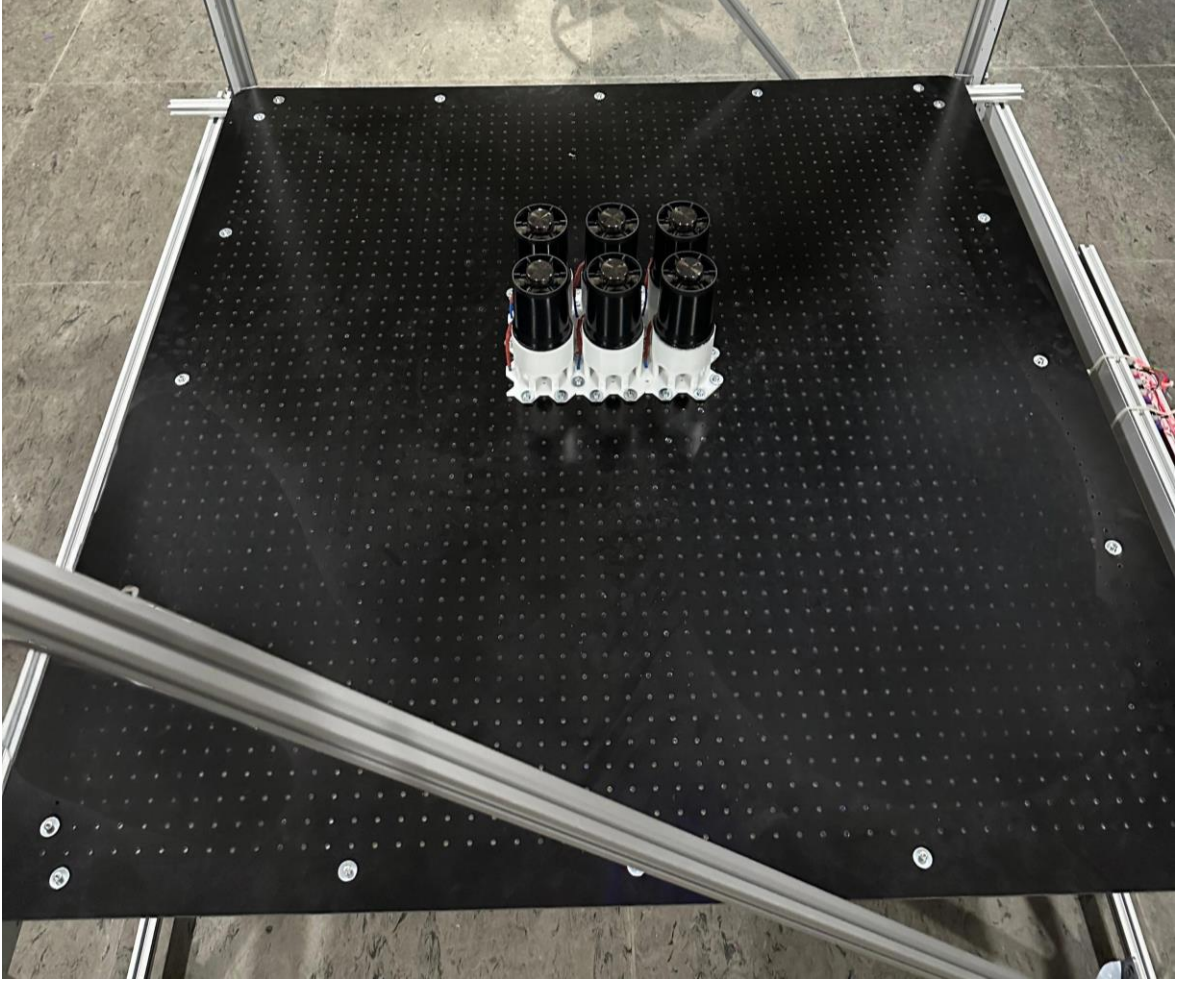
Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,3122 °C ve 0,6789 °C, en küçük ve en büyük R^2 değerleri ise sırasıyla %95,75 ve %98,10 olarak hesaplanmıştır. Dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasında oluşan en yüksek sıcaklık farkı 2,84 °C'dir. Bu değer aynı zamanda tüm diziler arasında görülen en yüksek sıcaklık farkı olarak kaydedilmiştir.

Altı ısıtıcılı ikinci dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R^2 değerleri sırasıyla 0,43 °C ve %96,94 olarak bulunmuştur. Tüm dizi sonuçları içinde en küçük ortalama R^2 değeri yine bu dizide elde edilmiştir.

Tablo 19. Altı ısıtıcıdan oluşan ikinci dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
MAE = 0,5615, R^2 = 0,9696		MAE = 0,4548, R^2 = 0,9648	
60 cm		80 cm	
MAE = 0,4308, R^2 = 0,9575		MAE = 0,3849, R^2 = 0,9681	
100 cm		120 cm	
MAE = 0,3219, R^2 = 0,9783		MAE = 0,3799, R^2 = 0,9702	

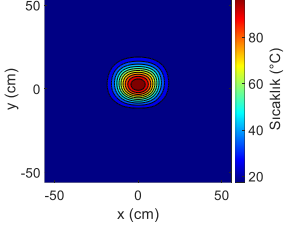
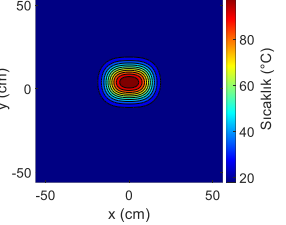
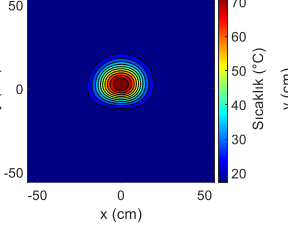
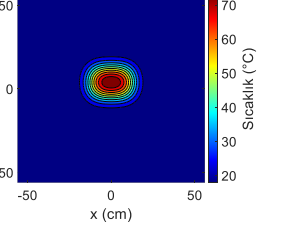
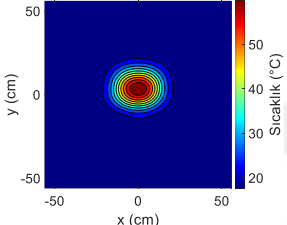
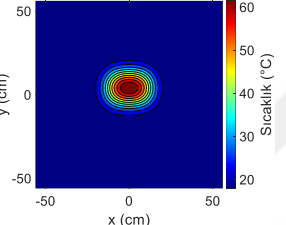
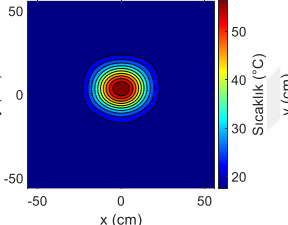
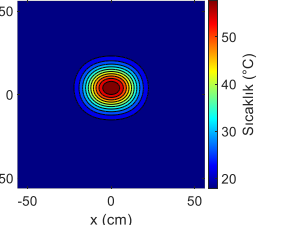
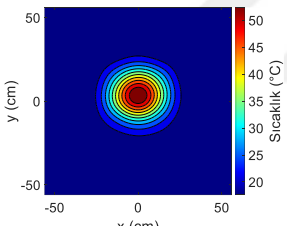
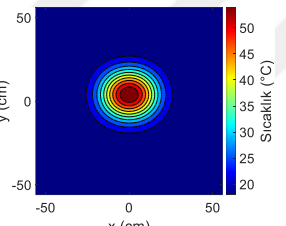
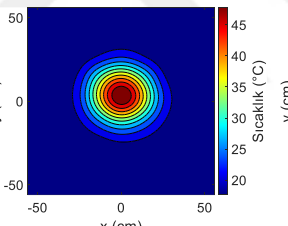
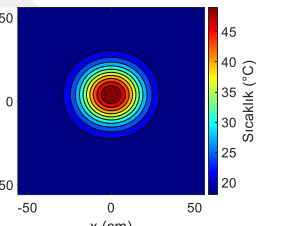
Altı ısıtıcı dizi için oluşturulan üçüncü modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-8, 0)$, ikinci ısıtıcı $(0, 0)$, üçüncü ısıtıcı $(8, 0)$, dördüncü ısıtıcı $(-8, 8)$, beşinci ısıtıcı $(0, 8)$ ve altıncı ısıtıcı $(8, 8)$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu diziden alınan ölçümler sırasında ortalama ortam sıcaklığı $17,95\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüş ve bu değer matematiksel modelde ortam sıcaklığı parametre değeri olarak ayarlanmıştır. Isıtıcıların ölçüm tablası üzerindeki yerleşimi Şekil 45'te görülmektedir.



Şekil 45. Altı ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm tablası üzerindeki görünümü

Diziden alınan ölçüm sonuçları ve matematiksel modellere ait kontur grafikleri Tablo 20'de verilmiştir. Tablo 20'de matematiksel model ile ölçüm sonucu arasındaki MAE ve R^2 değerleri de sunulmuştur.

Tablo 20. Altı ısıtıcıdan oluşan üçüncü dizinin ölçüm ve model sonuçları

Ölçüm	Model	Ölçüm	Model
20 cm		40 cm	
			
MAE = 0,6784, R ² = 0,9794		MAE = 0,4726, R ² = 0,9881	
60 cm		80 cm	
			
MAE = 0,2337, R ² = 0,9956		MAE = 0,2608, R ² = 0,9968	
100 cm		120 cm	
			
MAE = 0,3032, R ² = 0,9955		MAE = 0,3048, R ² = 0,9955	

Elde edilen sonuçlara göre, en küçük ve en büyük MAE değerleri sırasıyla 0,2292 °C ve 0,9788 °C, en küçük ve en büyük R² değerleri ise sırasıyla %96,57 ve %99,68 olarak hesaplanmıştır. Tüm sonuçlar içerisinde en büyük MAE değerine sahip ölçüm z = 10 cm iken bu dizide kaydedilmiştir. Dizide ölçüm sonucu ve matematiksel model arasındaki en yüksek sıcaklık farkı 1,92 °C'dir. Altı ısıtıcılı üçüncü dizi için tüm ölçümlerin ortalaması alındığında MAE ve R² değerleri sırasıyla 0,42 °C ve %98,98 olarak bulunmuştur.

Tüm ölçüm sonuçları için genel bir ortalama alındığında MAE ve R² değerleri sırasıyla 0,31 °C ve %98,18 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar fanlı ısıtıcı için elde edilen matematiksel modelin yüksek doğruluğa sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bir sonraki bölümde matematiksel model ve optimizasyon algoritmaları kullanılarak ölçüm sistemine gerek kalmadan uyarlanabilir ısıtma modellerinin elde edilmesine geçilmiştir.

2.6. Optimizasyon Algoritmaları ile Uyarlanabilir Isıtma Modellerinin Oluşturulması

Bu bölümde fanlı ısıtıcının matematiksel modelinden faydalanılarak MSO, RHO ve PSO algoritmaları ile uyarlanabilir ısıtma modelleri oluşturulmuştur. Optimizasyon algoritmalarında amaç fonksiyonu olarak SSE performans değerlendirme kriteri kullanılmıştır. Uyarlanabilir ısıtma modeli için yapılacak optimizasyon işlemi, ısıtıcı sayısı ve ısıtıcı-algılayıcı dizisi arasındaki mesafeye (z) bağlı olarak Tablo 21’de verilen dört farklı durum için gerçekleştirilebilir. Tablo 21’de ✓ biliniyor, ✗ ise bilinmiyor ifadelerini temsil etmektedir.

Tablo 21. Uyarlanabilir ısıtma modeli için optimizasyon senaryoları

Durum	Isıtıcı Sayısı	Mesafe (z)
I	✓	✓
II	✓	✗
III	✗	✓
IV	✗	✗

Tez çalışmasında yapılan optimizasyon uygulamaları Tablo 21’deki Durum II dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre ikili, üçlü, dördü, beşli ve altılı ısıtıcı dizilerinden elde edilebilecek ısıtma modellerinin her biri için iki farklı dizi ve mesafe seçilerek optimizasyon işlemi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak tablo ve grafikler halinde verilmiştir.

Tablo 22. Algoritmalar için belirlenen parametre değerleri

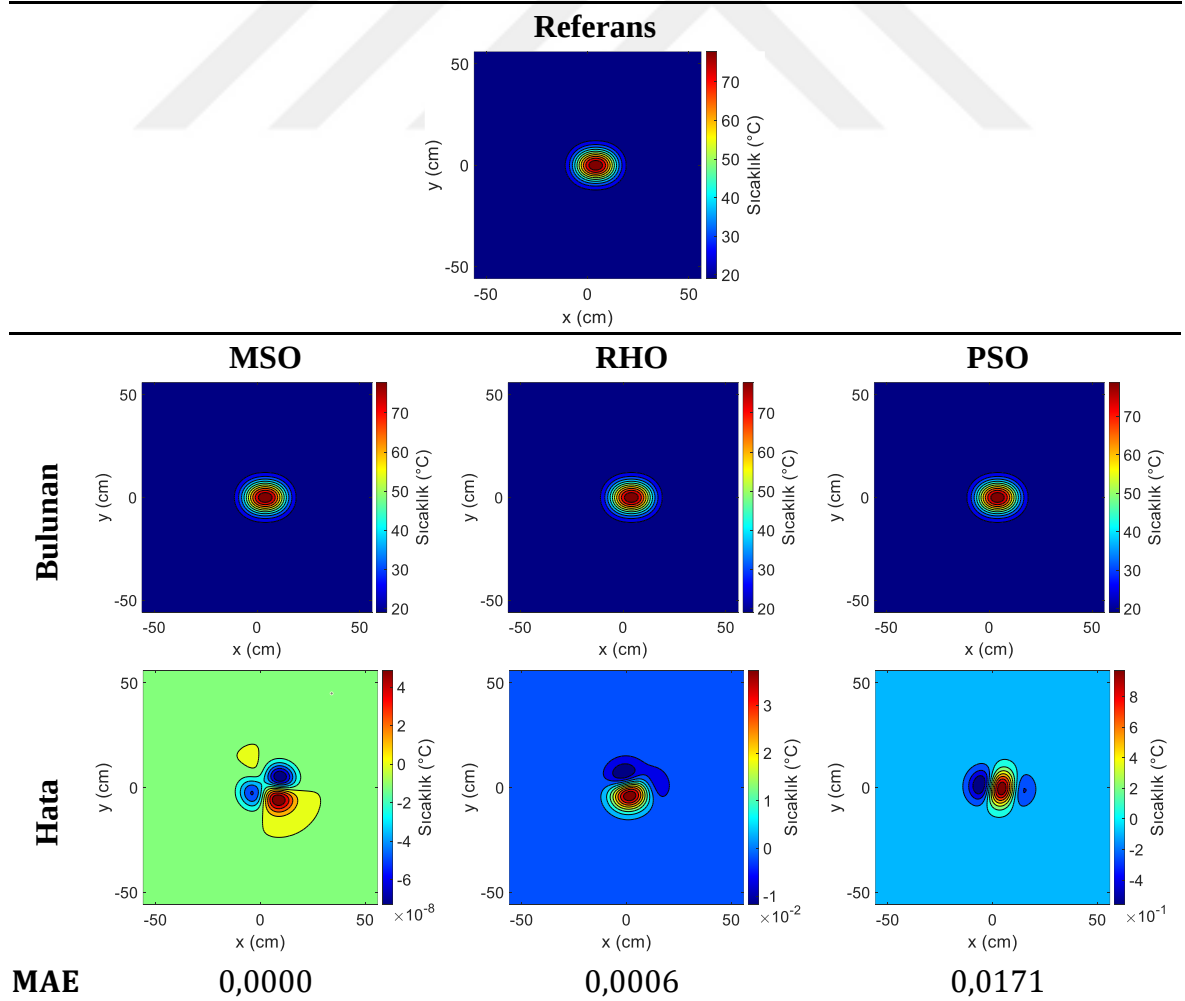
Parametre	Değer		
	MSO	RHO	PSO
Katsayılar	$a_1 = 1$	$C_1 = 0,7$	
	$a_2 = 1,5$	$C_2 = 0,8$	$C_1 = 1$
	$\mu = 0.01$	$W_{maks} = 1$	$C_2 = 3$
	$d = 5$	$W_{min} = 0$	
Popülasyon boyutu	Dişi: 450 Erkek: 450	900	900
Birey boyutları	5, 7, 9, 11 veya 13		
Maksimum yineleme sayısı	100		
xy koordinatları için boyut sınırları	[-56, 56]		
z koordinatı için boyut sınırı	[0, 120]		
Bağımsız deneme sayısı	10		

Optimizasyon algoritmalarında herhangi bir değişiklik yapılmamış ve en temel versiyonları kullanılmıştır. Her bir algoritma için yapılan 10 bağımsız deneme sonucunda elde edilen en iyi değerler dikkate alınmıştır. Optimizasyon yöntemleri için belirlenen parametre değerleri Tablo 22’de verilmiştir.

2.6.1. İki Isıtıcılı Diziler için Oluşturulan Uyarlanabilir Isıtma Modelleri

İki ısıtıcılı dizi için oluşturulan ilk referans modelin koordinatları birinci ısıtıcı (0, 0), ikinci ısıtıcı (8, 0) ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafe $z = 10$ cm olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda MSO, RHO ve PSO algoritmalarından elde edilen ısıtma ve hata modellerine ait kontur grafikleri Tablo 23’te verilmiştir. Tablo 23’te ayrıca optimizasyon yöntemlerinin referans modeli bulunurken oluşan ortalama mutlak hata (MAE) değerleri de sunulmuştur.

Tablo 23. İki ısıtıcılı birinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri



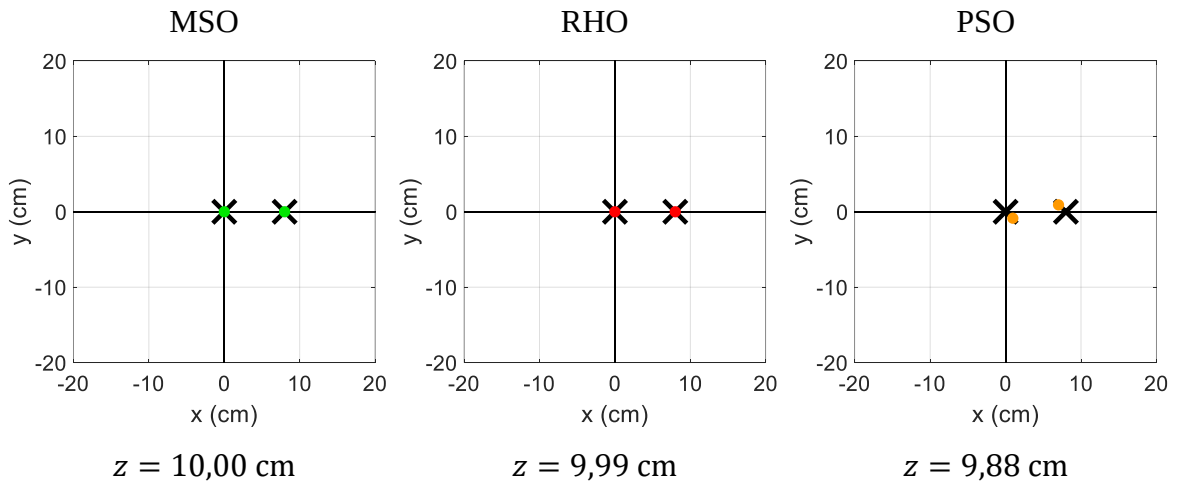
Tablo 23 incelendiğinde, üç optimizasyon algoritmasının da referans modeli başarılı bir şekilde elde edebildiği görülmektedir. MSO referans modeli en küçük MAE değeri ile belirleyerek en başarılı algoritma olmuştur. Hata modellerine ait sonuçlar incelendiğinde, MSO'nun, pozitif ve negatif en büyük hata değerleri 0,0000 °C'dir. İkinci RHO'nun pozitif en büyük hata (PEBH) değeri 0,0423 °C, negatif en büyük hata (NEBH) değeri ise 0,0118 °C'dir. Üçüncü PSO'nun PEBH değeri 1,1250 °C iken NEBH değeri 0,5589 °C'dir.

Optimizasyon algoritmalarının belirledikleri xy ısıtıcı koordinatları Tablo 24'teki gibidir. Bulunan koordinatlar için MAE hesaplandığında; MSO'nun 0,00 cm, RHO'nun 0,00 cm ve PSO'nun 0,93 cm hata ile referans ısıtıcı koordinatlarını tespit edebildiği görülmüştür.

Tablo 24. İki ısıtıcılı birinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları

OA	Isıtıcı 1		Isıtıcı 2	
	x_1	y_1	x_2	y_2
Referans	0,00	0,00	8,00	0,00
MSO	0,00	0,00	8,00	0,00
RHO	-0,01	-0,00	7,99	-0,00
PSO	0,96	-0,85	7,02	0,91

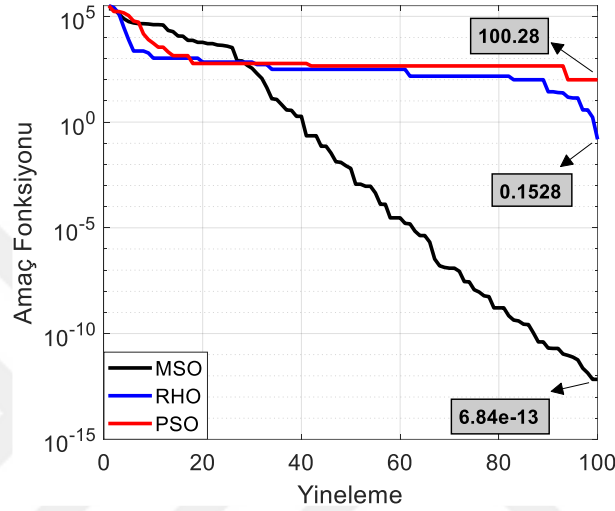
Bulunan koordinatların xy düzleminde gösterimi ve optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen z değerleri sırasıyla görsel ve sayısal olarak Şekil 46'da verilmiştir. Burada $\times$ referans koordinatı, $\bullet$ ise bulunan koordinatı temsil etmektedir.



Şekil 46. İki ısıtıcılı birinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları

Elde edilen sonuçlara göre, MSO xy koordinatlarında olduğu gibi z değerini de 0,00 cm hata ile tespit etmiştir. RHO'da bu değer 0,01 cm iken, PSO'da 0,12 cm olmuştur.

Optimizasyon algoritmalarının yakınsama grafikleri Şekil 47'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu için en iyi uygunluk değerini MSO'nun elde ettiği görülürken, ikinci ve üçüncü en iyi uygunluk değerine sahip algoritmalar sırasıyla RHO ve PSO olmuştur.



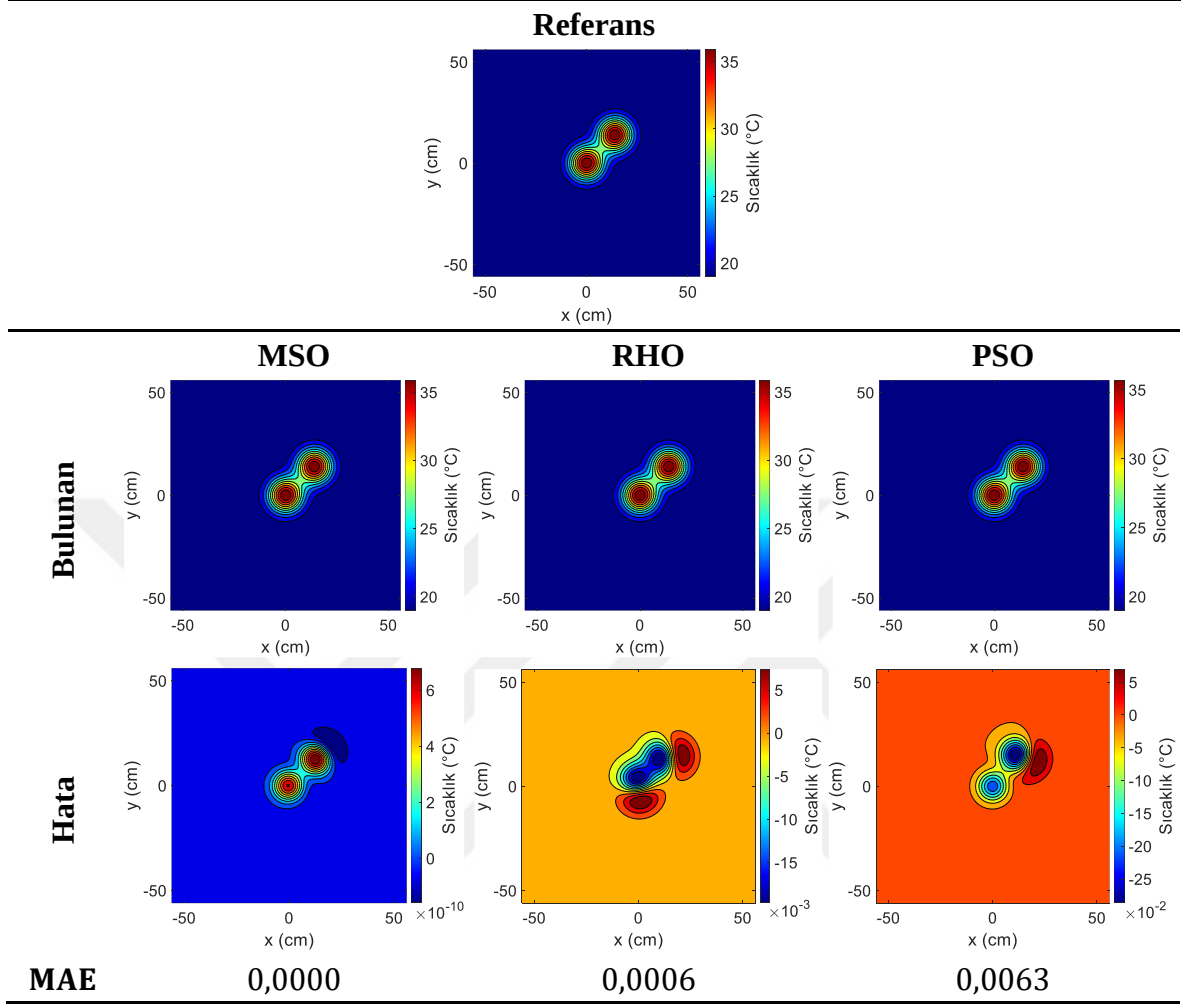
Şekil 47. İki ısıtıcı birinci dizi için yakınsama grafikleri

100 yineleme sonucunda PSO 94. yinelemede nihai yakınsama değerine ulaşırken MSO ve RHO henüz son değerlerini almamıştır.

İki ısıtıcı dizi için oluşturulan ikinci referans modelin koordinatları birinci ısıtıcı (0,0), ikinci ısıtıcı (14,14) ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafe $z = 50$ cm olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda MSO, RHO ve PSO algoritmalarından elde edilen ısıtma ve hata modellerine ait kontur grafikleri Tablo 25'te verilmiştir. Tablo 25'te optimizasyon algoritmalarının referans modeli bulurken oluşan MAE değerleri de sunulmuştur.

Tablo 25 incelendiğinde üç optimizasyon algoritmasının da referans modeli hatasız ya yakın bir şekilde elde edebildiği görülmektedir. MSO referans modeli en küçük MAE değeri ile belirleyerek en başarılı algoritma olmuştur. Hata modellerine ait sonuçlar incelendiğinde, MSO'nun, PEBH ve NEBH değerleri 0,0000 °C'dir. İkinci RHO'nun PEBH değeri 0,0101 °C, NEBH değeri ise 0,0197 °C'dir. Üçüncü PSO'nun PEBH değeri 1,1045 °C iken NEBH değeri 0,2860 °C'dir.

Tablo 25. İki ısıtıcılı ikinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri

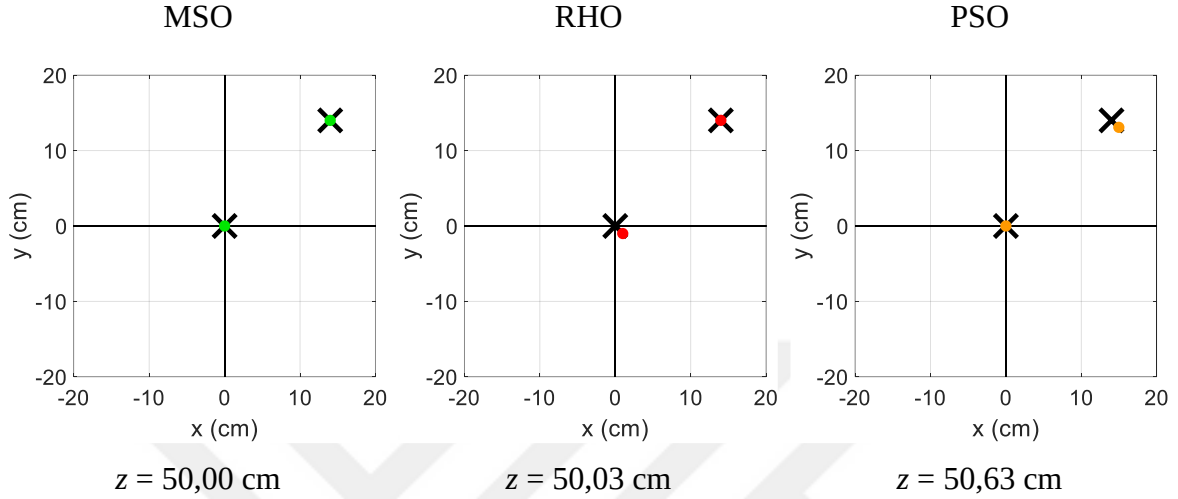


Optimizasyon algoritmalarının belirledikleri xy ısıtıcı koordinatları Tablo 26'daki gibidir. Bulunan koordinatlar için MAE hesaplandığında; MSO'nun 0,00 cm, RHO'nun 0,50 cm ve PSO'nun 0,47 cm hata ile referans ısıtıcı koordinatlarını belirleyebildiği görülmüştür. Bu dizi için elde edilen genel sonuçlarda PSO sonuncu olmasına rağmen xy koordinatlarının tespit edilmesinde RHO'dan daha başarılı olmuştur.

Tablo 26. İki ısıtıcılı ikinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları

OA	Isıtıcı 1		Isıtıcı 2	
	x_1	y_1	x_2	y_2
Referans	0,00	0,00	14,00	14,00
MSO	0,00	0,00	14,00	14,00
RHO	0,99	-0,99	14,00	14,00
PSO	0,00	0,00	14,97	13,08

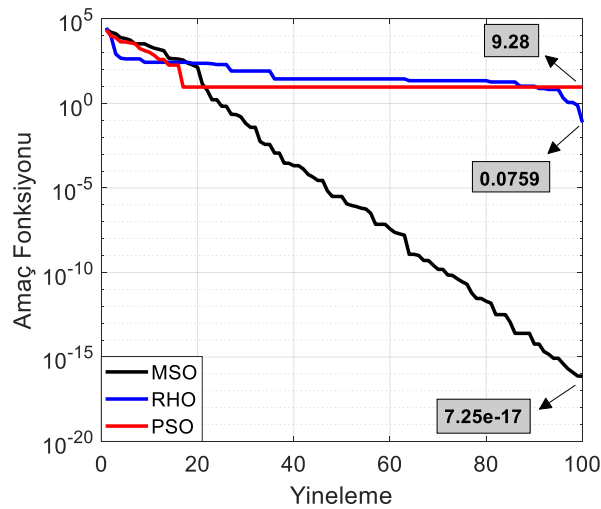
Bulunan koordinatların xy düzleminde gösterimi ve optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen z değerleri sırasıyla görsel ve sayısal olarak Şekil 48’de verilmiştir. Burada $\times$ referans koordinatı, $\bullet$ ise bulunan koordinatı temsil etmektedir.



Şekil 48. İki ısıtıcı ikinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları

Elde edilen sonuçlara göre, MSO xy koordinatlarında olduğu gibi z değerini de 0,00 cm hata ile tespit etmiştir. RHO’da bu değer 0,03 cm iken, PSO’da 0,63 cm olmuştur.

Optimizasyon algoritmalarının yakınsama grafikleri Şekil 49’da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu için en iyi uygunluk değerini yine MSO’nun elde ettiği görülürken, ikinci ve üçüncü en iyi uygunluk değerine sahip algoritmalar sırasıyla RHO ve PSO olmuştur.



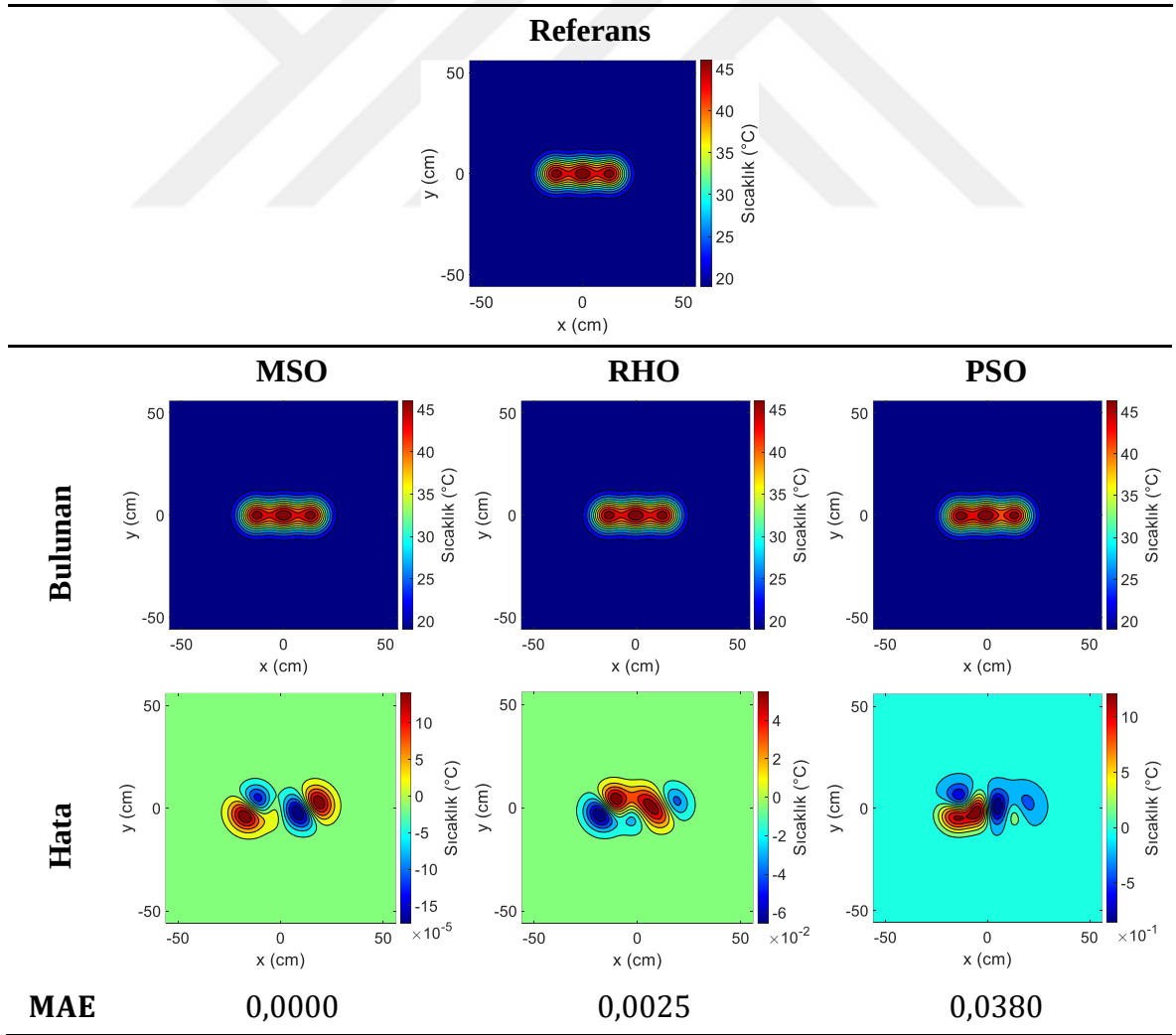
Şekil 49. İki ısıtıcı ikinci dizi için yakınsama grafikleri

100 yineleme sonucunda PSO 17. yinelemede nihai yakınsama değerini elde ederken MSO ve RHO henüz son değerlerini almamıştır.

2.6.2. Üç Isıtıcılı Diziler için Oluşturulan Uyarlanabilir Isıtma Modelleri

Üç ısıtıcılı dizi için oluşturulan ilk referans modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-14, 0)$, ikinci ısıtıcı $(0, 0)$, üçüncü ısıtıcı $(14, 0)$ ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafe $z = 30$ cm olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda MSO, RHO ve PSO algoritmalarından elde edilen ısıtma ve hata modellerine ait kontur grafikleri Tablo 27’de verilmiştir. Tablo 27’de optimizasyon algoritmalarının referans modeli bulurken oluşan MAE değerleri de sunulmuştur.

Tablo 27. Üç ısıtıcılı birinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri



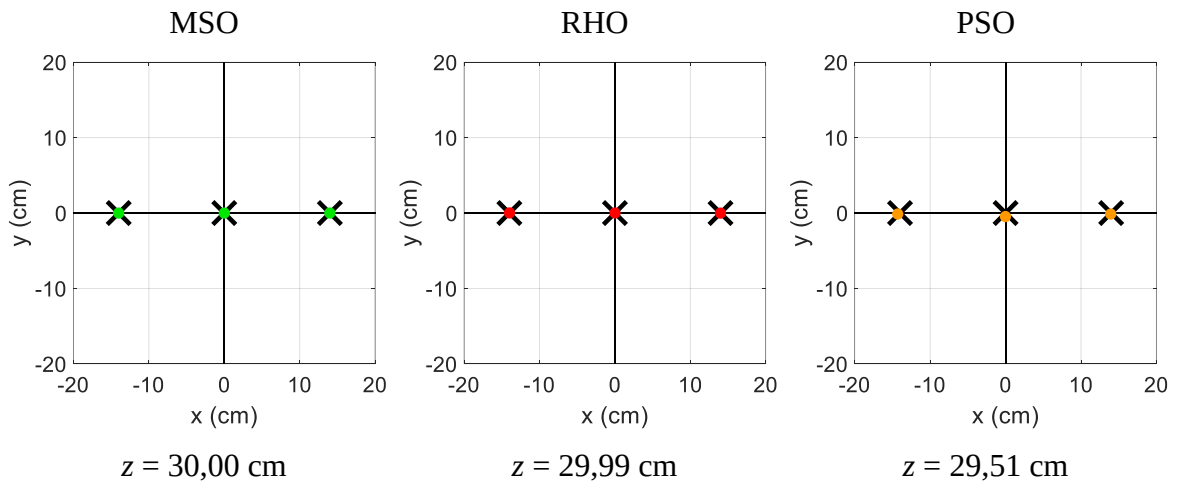
Tablo 27 incelendiğinde üç optimizasyon algoritmasının da referans modeli başarılı bir şekilde elde edebildiği görülmektedir. Bu dizide de MSO yine referans modeli en küçük MAE değeri ile belirleyerek en başarılı algoritma olmuştur. Hata modellerine ait sonuçlar incelendiğinde, MSO'nun, PEBH ve NEBH değerleri $0,0002\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. İkinci RHO'nun PEBH değeri $0,0668\text{ }^{\circ}\text{C}$, NEBH değeri ise $0,0025\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Üçüncü PSO'nun PEBH değeri $1,4139\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken NEBH değeri $0,8610\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir.

Optimizasyon algoritmalarının belirledikleri xy ısıtıcı koordinatları Tablo 28'deki gibidir. Bulunan koordinatlar için MAE hesaplandığında; MSO'nun $0,00\text{ cm}$, RHO'nun $0,01\text{ cm}$ ve PSO'nun $0,18\text{ cm}$ hata ile referans ısıtıcı koordinatlarını belirleyebildiği görülmüştür.

Tablo 28. Üç ısıtıcılı birinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları

OA	Isıtıcı 1		Isıtıcı 2		Isıtıcı 3	
	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3
Referans	-14,00	0,00	0,00	0,00	14,00	0,00
MSO	-14,00	0,00	0,00	0,00	14,00	0,00
RHO	-13,99	0,02	0,01	0,01	13,99	-0,01
PSO	-14,29	-0,13	-0,02	-0,46	13,94	-0,13

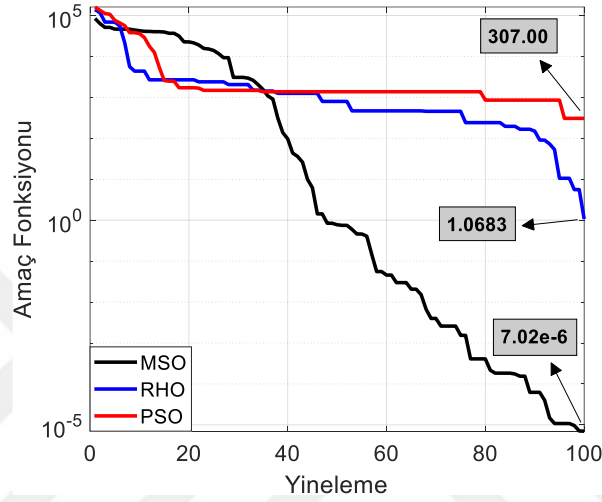
Bulunan koordinatların xy düzleminde gösterimi ve optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen z değerleri sırasıyla görsel ve sayısal olarak Şekil 50'de verilmiştir. Burada $\times$ referans koordinatı, $\bullet$ ise bulunan koordinatı temsil etmektedir.



Şekil 50. Üç ısıtıcılı birinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları

Elde edilen sonuçlara göre, MSO xy koordinatlarında olduğu gibi z değerini de 0,00 cm hata ile tespit etmiştir. RHO'da bu değer 0,01 cm iken, PSO'da 0,49 cm olmuştur.

Optimizasyon algoritmalarının yakınsama grafikleri Şekil 51'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu için en iyi uygunluk değerini yine açık bir şekilde MSO'nun elde ettiği görülürken, ikinci ve üçüncü en iyi uygunluk değerine sahip algoritmalar sırasıyla RHO ve PSO olmuştur.



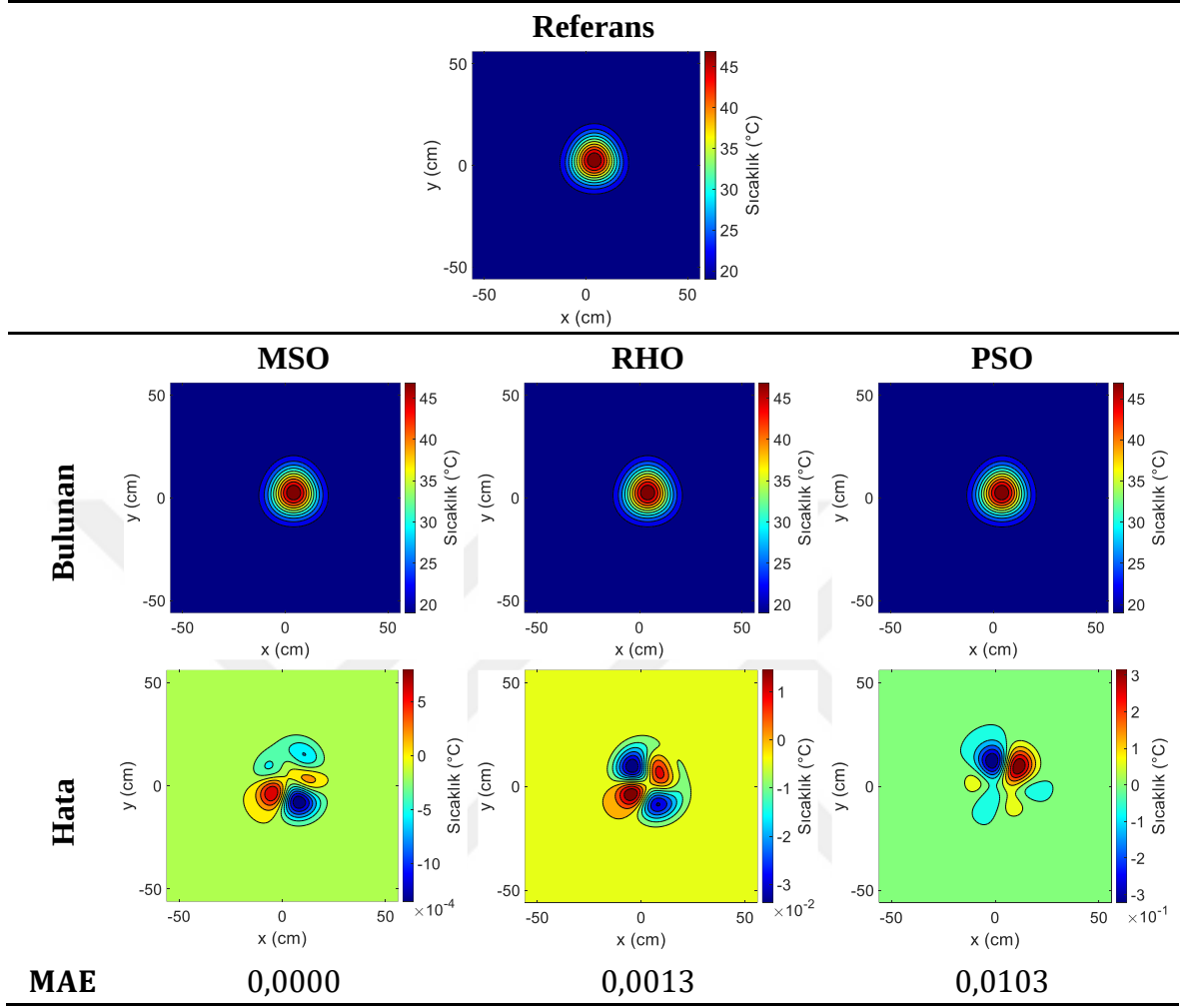
Şekil 51. Üç ısıtıcı birinci dizi için yakınsama grafikleri

100 yineleme sonucunda PSO 96. yinelemede nihai yakınsama değerine ulaşırken MSO ve RHO henüz son değerlerini almamıştır.

Üç ısıtıcı dizi için oluşturulan ikinci referans modelin koordinatları birinci ısıtıcı (0,0), ikinci ısıtıcı (8,0), üçüncü ısıtıcı (4,8) ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafe $z = 70$ cm olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda MSO, RHO ve PSO algoritmalarından elde edilen ısıtma ve hata modellerine ait kontur grafikleri Tablo 29'da verilmiştir. Tablo 29'da optimizasyon algoritmalarının referans modeli bulurken oluşan MAE değerleri de sunulmuştur.

Tablo 29'daki grafikler incelendiğinde yine üç optimizasyon algoritmasının da referans modeli başarılı bir şekilde elde edebildiği görülmektedir. Önceki dizi sonuçlarında olduğu gibi MSO, referans modeli en küçük MAE değeri ile belirleyerek en başarılı algoritma olmuştur. Hata modellerinden elde edilen sonuçlara göre, MSO'da, PEBH değeri 0,0008 °C iken NEBH değeri 0,0014 °C'dir. İkinci RHO'nun PEBH değeri 0,0193 °C, NEBH değeri ise 0,0338 °C'dir. Üçüncü PSO'nun PEBH değeri 0,3777 °C iken NEBH değeri 0,3219 °C'dir.

Tablo 29. Üç ısıtıcılı ikinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri

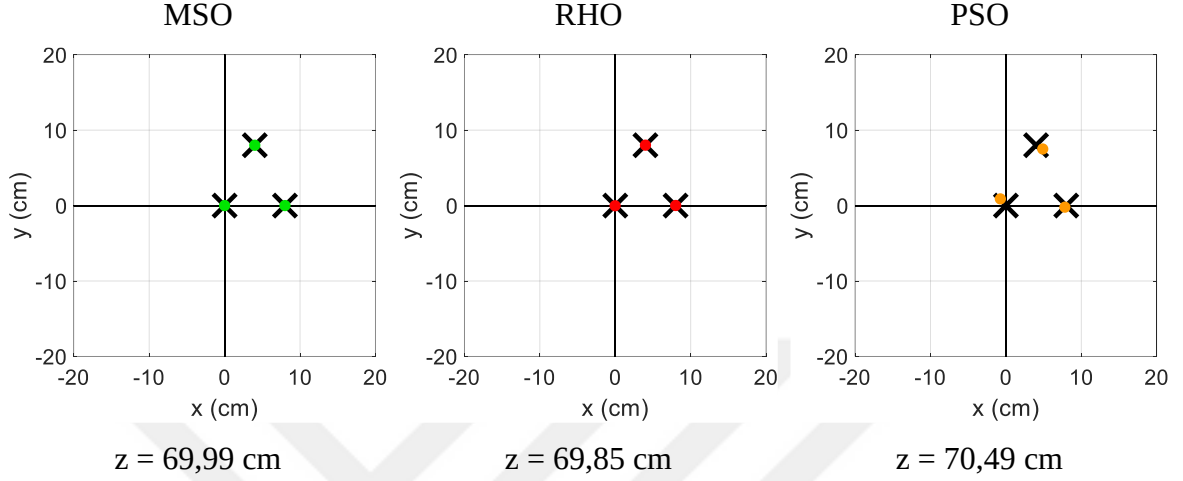


Optimizasyon algoritmalarının belirledikleri xy ısıtıcı koordinatları Tablo 30'daki gibidir. Bulunan koordinatlar için MAE hesaplandığında; MSO'nun 0,00 cm, RHO'nun 0,01 cm ve PSO'nun 0,57 cm hata ile referans ısıtıcı koordinatlarını belirleyebildiği görülmüştür.

Tablo 30. Üç ısıtıcılı ikinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları

OA	Isıtıcı 1		Isıtıcı 2		Isıtıcı 3	
	x1	y1	x2	y2	x3	y3
Referans	0,00	0,00	8,00	0,00	4,00	8,00
MSO	-0,00	-0,00	8,00	0,00	4,00	7,99
RHO	-0,02	-0,03	8,01	0,01	4,01	8,01
PSO	-0,74	0,89	7,82	-0,21	4,88	7,50

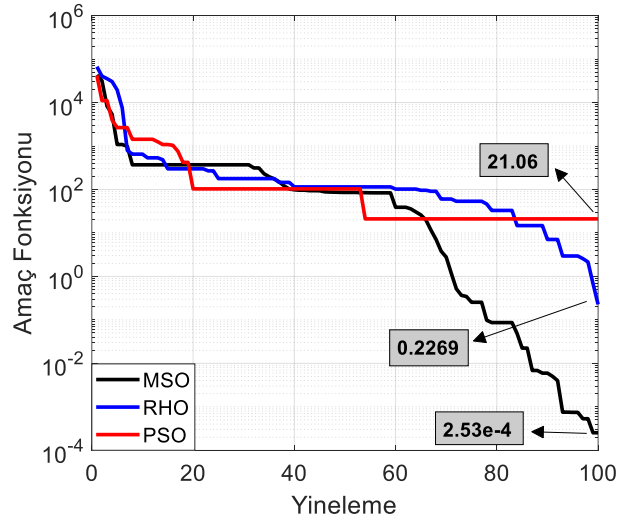
Bulunan koordinatların xy düzleminde gösterimi ve optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen z değerleri sırasıyla görsel ve sayısal olarak Şekil 52’de verilmiştir. Burada $\times$ referans koordinatı, $\bullet$ ise bulunan koordinatı temsil etmektedir.



Şekil 52. Üç ısıtıcı ikinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları

Sonuçlar incelendiğinde MSO z koordinatını 0,01 cm hata ile tespit etmiştir. RHO’da bu değer 0,15 cm iken, PSO’da 0,49 cm olmuştur.

Optimizasyon algoritmalarının yakınsama grafikleri Şekil 53’te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu için en iyi uygunluk değerini MSO’nun elde ettiği görülürken, ikinci ve üçüncü en iyi uygunluk değerine sahip algoritmalar sırasıyla RHO ve PSO olmuştur.



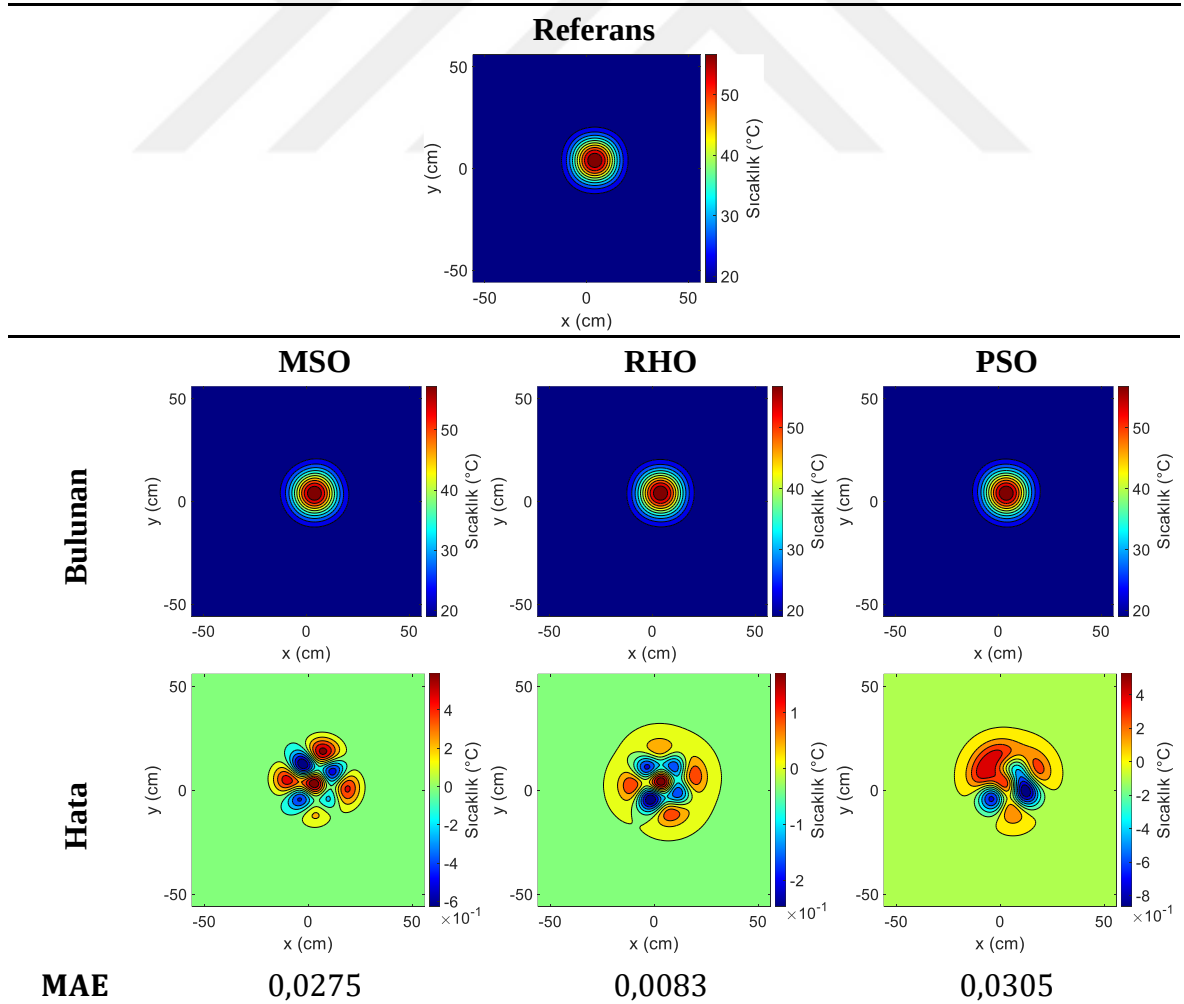
Şekil 53. Üç ısıtıcı ikinci dizi için yakınsama grafikleri

100 yineleme sonucunda PSO 54. yinelemede nihai yakınsama değerine ulaşırken MSO ve RHO henüz son değerlerini almamıştır.

2.6.3. Dört Isıtıcılı Diziler için Oluşturulan Uyarlanabilir Isıtma Modelleri

Dört ısıtıcılı dizi için oluşturulan ilk referans modelin koordinatları birinci ısıtıcı (0,0), ikinci ısıtıcı (8,0), üçüncü ısıtıcı (0,8), dördüncü ısıtıcı (8,8) ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafe $z = 60$ cm olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda MSO, RHO ve PSO algoritmalarından elde edilen ısıtma ve hata modellerine ait kontur grafikleri Tablo 31’de verilmiştir. Tablo 31’de optimizasyon algoritmalarının referans modeli bulurken oluşan MAE değerleri de sunulmuştur.

Tablo 31. Dört ısıtıcılı birinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri



Tablo 31 incelendiğinde üç optimizasyon algoritmasının da referans modeli başarılı bir şekilde elde edebildiği görülmektedir. Bu dizide RHO ilk kez referans modeli en küçük MAE değeri ile belirleyerek en başarılı algoritma olmuştur. Hata modellerinden elde edilen sonuçlara göre, RHO’da, PEBH değeri 0,2111 °C iken NEBH değeri 0,2470 °C’dir. İkinci MSO’nun PEBH değeri 0,7104 °C, NEBH değeri ise 0,6267 °C’dir. Üçüncü PSO’nun PEBH değeri 0,5256 °C iken NEBH değeri 0,8661 °C’dir.

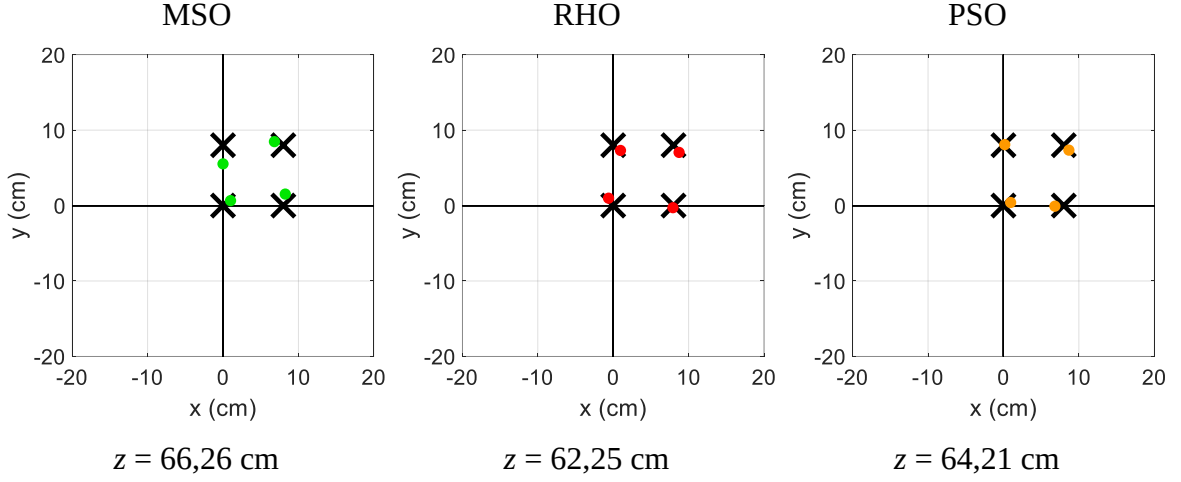
Optimizasyon algoritmalarının belirledikleri xy ısıtıcı koordinatları Tablo 32’deki gibidir. Bulunan koordinatlar için MAE hesaplandığında; RHO’nun 0,66 cm, MSO’nun 0,95 cm ve PSO’nun 0,53 cm hata ile referans ısıtıcı koordinatlarını belirleyebildiği görülmüştür. Bu dizi için elde edilen genel sonuçlarda PSO sonuncu olmasına rağmen xy koordinatlarının tespit edilmesinde hem MSO hem de RHO’dan daha başarılı olmuştur.

Tablo 32. Dört ısıtıcılı birinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları

OA	Isıtıcı 1		Isıtıcı 2		Isıtıcı 3		Isıtıcı 4	
	x ₁	y ₁	x ₂	y ₂	x ₃	y ₃	x ₄	y ₄
Referans	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00	8,00	8,00	8,00
MSO	1,00	0,66	8,26	1,52	-0,00	5,53	6,82	8,48
RHO	-0,62	0,98	7,92	-0,28	0,97	7,31	8,74	7,05
PSO	0,95	0,41	6,82	-0,08	0,17	8,08	8,68	7,35

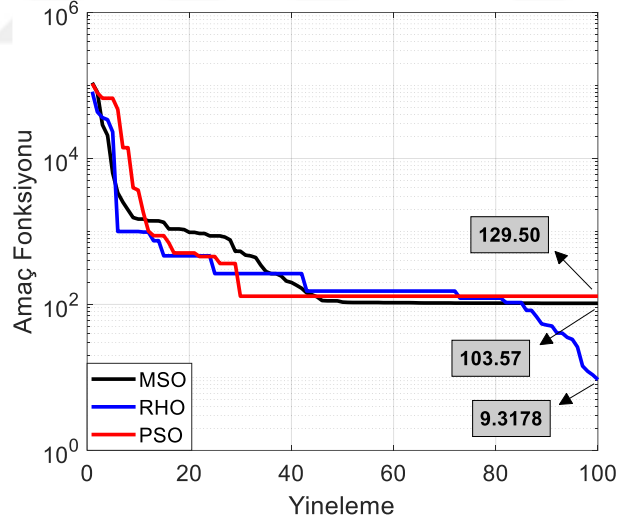
Bulunan koordinatların xy düzleminde gösterimi ve optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen z değerleri sırasıyla görsel ve sayısal olarak Şekil 54’te verilmiştir. Burada $\times$ referans koordinatı, $\bullet$ ise bulunan koordinatı temsil etmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre RHO z değerini 2,25 cm hata ile tespit etmiştir. MSO’da bu değer 6,26 cm iken, PSO’da 4,21 cm olmuştur. Bu dizi özelinde PSO, hem xy koordinatları hem de z koordinatının bulunmasında MSO’dan daha iyi sonuçlar elde etmesine rağmen model doğruluğu için kullanılan hata metriklerine göre MSO’nun gerisinde kalarak sonuncu olmuştur. Yine z koordinatının tespit edilmesinde optimizasyon algoritmaları en büyük hata değerlerine bu dizide ulaşmıştır. Bu durum 60 ve 70 cm’lik mesafelerde oluşan ısıtıcı modellerinin birbirlerine çok yakın değerlerde olmasından kaynaklanmıştır.



Şekil 54. Dört ısıtıcı birinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları

Optimizasyon algoritmalarının yakınsama grafikleri Şekil 55'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu için en iyi uygunluk değerini RHO'nun elde ettiği görülürken, ikinci ve üçüncü en iyi uygunluk değerine sahip algoritmalar sırasıyla birbirlerine çok yakın değerlere sahip olan MSO ve PSO olmuştur.



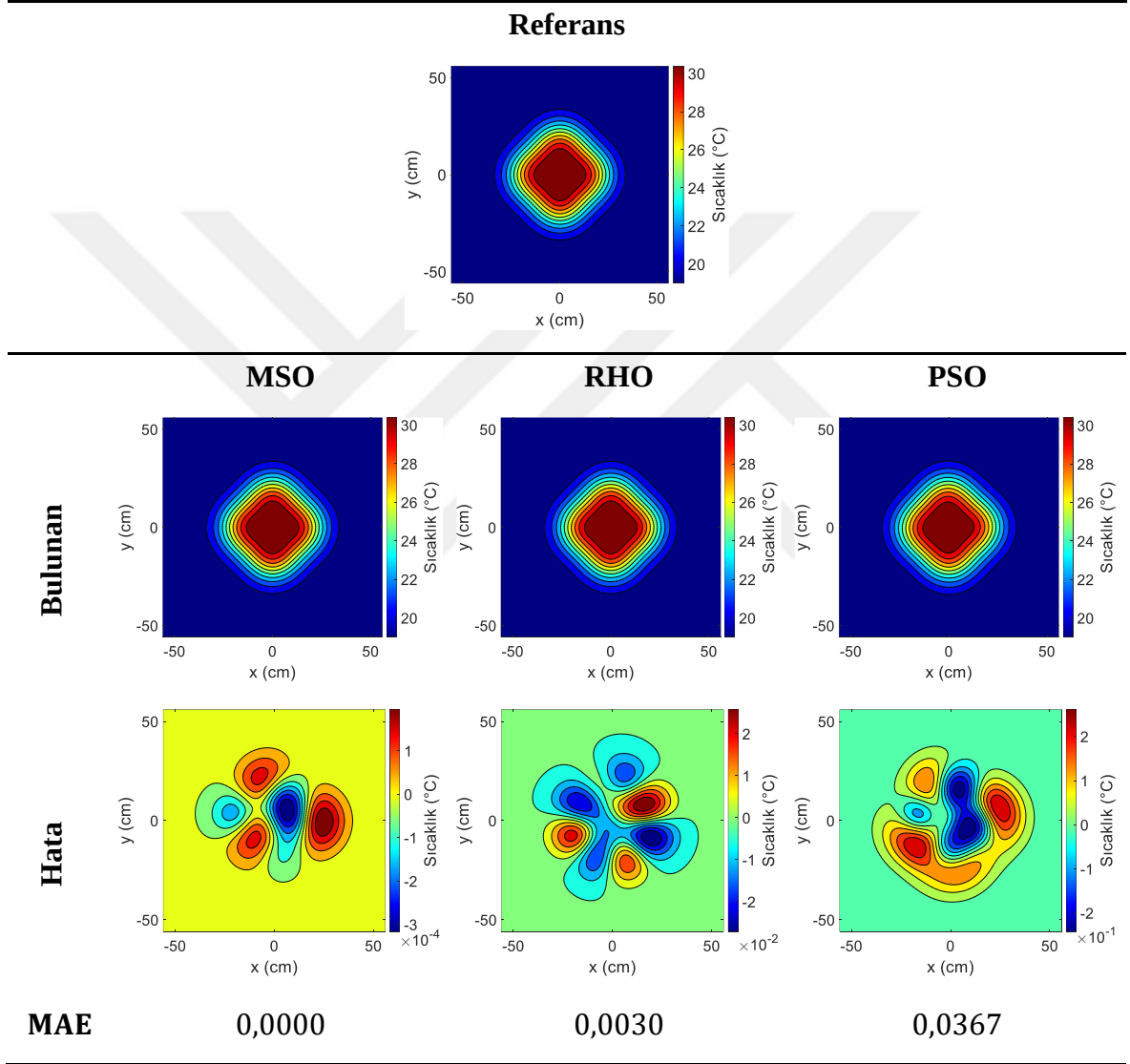
Şekil 55. Dört ısıtıcı birinci dizi için yakınsama grafikleri

100 yineleme sonucunda PSO ve MSO sırasıyla 30. ve 89. yinelemede nihai yakınsama değerine ulaşırken RHO henüz son değerini almamıştır.

Dört ısıtıcı birinci dizi için oluşturulan ikinci referans modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-14, 0)$, ikinci ısıtıcı $(14, 0)$, üçüncü ısıtıcı $(0, 14)$, dördüncü ısıtıcı $(0, -14)$ ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafe $z = 100$ cm olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre

gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda MSO, RHO ve PSO algoritmalarından elde edilen ısıtma ve hata modellerine ait kontur grafikleri Tablo 33'te verilmiştir. Tablo 33'te optimizasyon algoritmalarının referans modeli bulurken oluşan MAE değerleri de sunulmuştur.

Tablo 33. Dört ısıtıcı ikinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri



Tablo 33 incelendiğinde üç optimizasyon algoritmasının da referans modeli başarılı bir şekilde elde edebildiği görülmektedir. MSO, referans modeli en küçük MAE değeri ile belirleyerek en başarılı algoritma olmuştur. Hata modellerinden elde edilen sonuçlara göre MSO'da, PEBH ve NEBH değerleri 0,0003 °C'dir. İkinci RHO'nun PEBH değeri

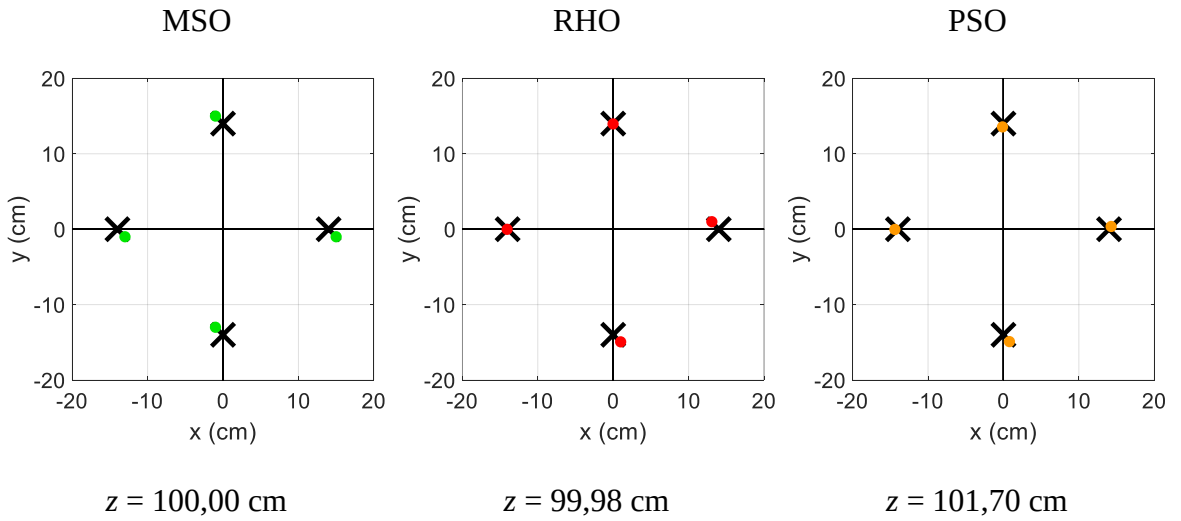
0,0311 °C, NEBH değeri ise 0,0271 °C'dir. Üçüncü PSO'nun PEBH değeri 0,2611 °C iken NEBH değeri 0,2432 °C'dir.

Optimizasyon algoritmalarının belirledikleri xy ısıtıcı koordinatları Tablo 34'teki gibidir. Bulunan koordinatlar için MAE hesaplandığında; MSO'nun 0,99 cm, RHO'nun 0,50 cm ve PSO'nun 0,42 cm hata ile referans ısıtıcı koordinatlarını belirleyebildiği görülmüştür. Bu dizi için elde edilen genel sonuçlarda PSO sonuncu olmasına rağmen bir önceki dizide olduğu gibi xy koordinatlarının tespit edilmesinde hem MSO hem de RHO'dan daha başarılı olmuştur.

Tablo 34. Dört ısıtıcılı ikinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları

OA	Isıtıcı 1		Isıtıcı 2		Isıtıcı 3		Isıtıcı 4	
	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4
Referans	-14,00	0,00	14,00	0,00	0,00	14,00	0,00	-14,00
MSO	-13,00	-0,99	15,00	-0,99	-0,99	14,99	-0,99	-13,00
RHO	-14,07	-0,01	13,08	0,99	-0,02	13,96	0,99	-14,94
PSO	-14,39	-0,03	14,28	0,36	-0,13	13,56	0,79	-14,90

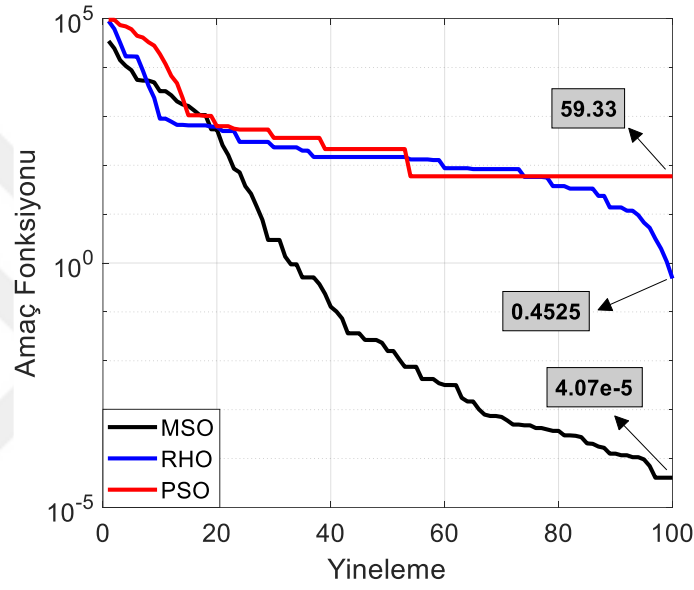
Bulunan koordinatların xy düzleminde gösterimi ve optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen z değerleri sırasıyla görsel ve sayısal olarak Şekil 56'da verilmiştir. Burada $\times$ referans koordinatı, $\bullet$ ise bulunan koordinatı temsil etmektedir.



Şekil 56. Dört ısıtıcılı ikinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları

Elde edilen sonuçlara göre MSO z değerini 0,00 cm hata ile tespit etmiştir. RHO'da bu değer 0,02 cm iken, PSO'da 1,70 cm olmuştur.

Optimizasyon algoritmalarının yakınsama grafikleri Şekil 57'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu için en iyi uygunluk değerini MSO'nun elde ettiği görülürken, ikinci ve üçüncü en iyi uygunluk değerine sahip algoritmalar sırasıyla RHO ve PSO olmuştur.



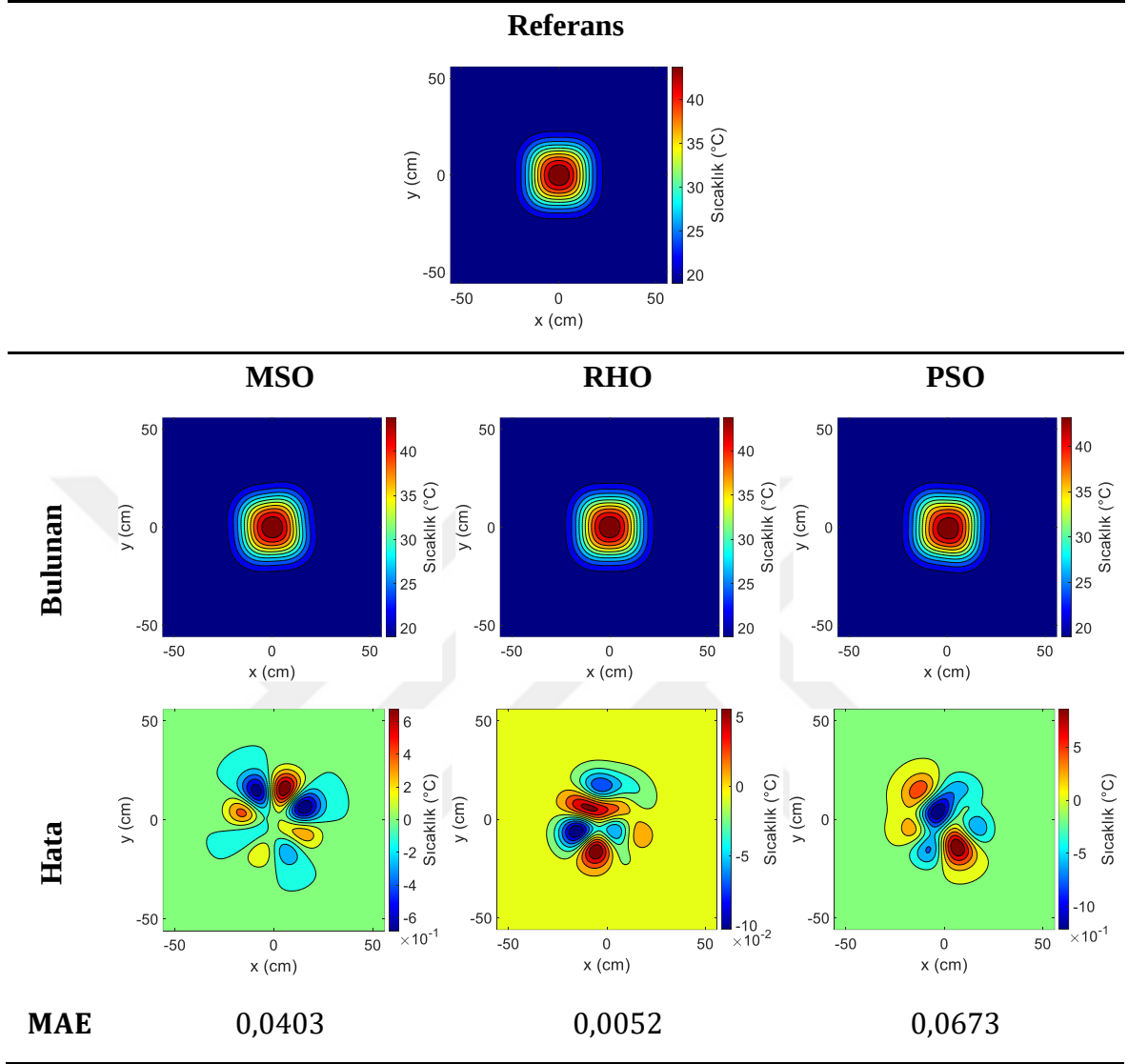
Şekil 57. Dört ısıtıcı ikinci dizi için yakınsama grafikleri

100 yineleme sonucunda PSO 54. yinelemede nihai yakınsama değerine ulaşırken MSO ve RHO henüz son değerlerini almamıştır.

2.6.4. Beş Isıtıcı Diziler için Oluşturulan Uyarlanabilir Isıtma Modelleri

5 ısıtıcı dizi için oluşturulan ilk referans modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-8, -8)$, ikinci ısıtıcı $(-8, 8)$, üçüncü ısıtıcı $(0, 0)$, dördüncü ısıtıcı $(8, -8)$, beşinci ısıtıcı $(8, 8)$ ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafe $z = 80$ cm olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda MSO, RHO ve PSO algoritmalarından elde edilen ısıtma ve hata modellerine ait kontur grafikleri Tablo 35'te verilmiştir. Tablo 35'te optimizasyon algoritmalarının referans modeli bulurken oluşan MAE değerleri de sunulmuştur.

Tablo 35. Beş ısıtıcılı birinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri



Tablo 35 incelendiğinde RHO referans modeli başarılı bir şekilde elde ederken, MSO ve PSO'da oluşan model hataları kontur grafiklerinden görülmektedir. Buna paralel olarak, elde edilen sonuçlar RHO'nun referans modeli en küçük MAE değeri ile belirleyerek en başarılı algoritma olduğunu göstermiştir. Hata modellerinden elde edilen sonuçlara göre, RHO'da, PEBH değeri 0,0715 °C iken NEBH 0,1031 °C'dir. İkinci MSO'nun PEBH değeri 0,8124 °C, NEBH değeri ise 0,6807 °C'dir. Üçüncü PSO'nun PEBH değeri 1,0652 °C iken NEBH değeri 1,2194 °C'dir.

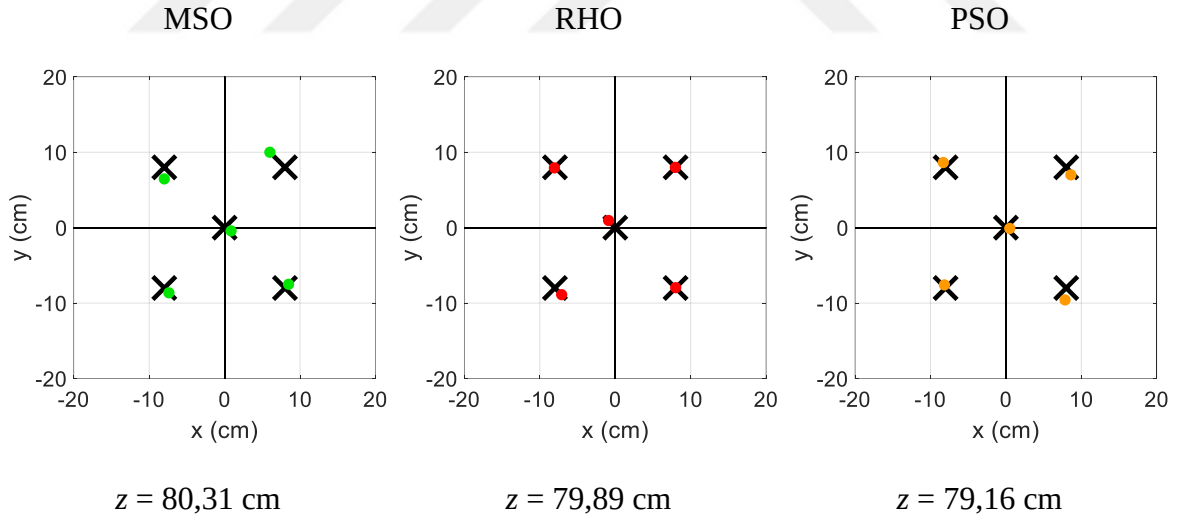
Optimizasyon algoritmalarının belirledikleri xy ısıtıcı koordinatları Tablo 36'daki gibidir. Bulunan koordinatlar için MAE hesaplandığında; RHO'nun 0,38 cm, MSO'nun 0,91 cm ve PSO'nun 0,55 cm hata ile referans ısıtıcı koordinatlarını tespit edebildiği

görülmüştür. Bu dizi için elde edilen genel sonuçlarda PSO sonuncu olmasına rağmen xy koordinatlarının belirlenmesinde MSO'dan daha başarılı olmuştur.

Tablo 36. Beş ısıtıcılı birinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları

OA	Isıtıcı 1		Isıtıcı 2		Isıtıcı 3		Isıtıcı 4		Isıtıcı 5	
	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	x_5	y_5
Referans	-8,00	-8,00	-8,00	8,00	0,00	0,00	8,00	-8,00	8,00	8,00
MSO	-7,39	-8,64	-8,00	6,46	0,86	-0,43	8,48	-7,51	6,00	10,00
RHO	-7,12	-8,88	-8,07	7,93	-0,89	0,95	8,02	-7,99	7,97	7,99
PSO	-8,15	-7,59	-8,31	8,64	0,51	-0,11	7,84	-9,58	8,61	7,01

Bulunan koordinatların xy düzleminde gösterimi ve optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen z değerleri sırasıyla görsel ve sayısal olarak Şekil 58'de verilmiştir. Burada $\times$ referans koordinatı, $\bullet$ ise bulunan koordinatı temsil etmektedir.

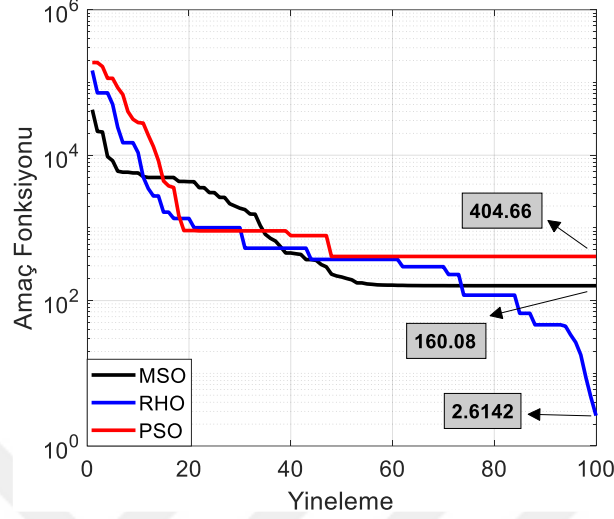


Şekil 58. Beş ısıtıcılı birinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları

Sonuçlar incelendiğinde RHO z değerini 0,11 cm hata ile tespit etmiştir. MSO'da bu değer 0,31 cm iken, PSO'da 0,84 cm olmuştur.

Optimizasyon algoritmalarının yakınsama grafikleri Şekil 59'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu için en iyi uygunluk değerini RHO'nun elde ettiği

görüldürken, ikinci ve üçüncü en iyi uygunluk değerine sahip algoritmalar sırasıyla MSO ve PSO olmuştur.



Şekil 59. Beş ısıtıcılı birinci dizi için yakınsama grafikleri

100 yineleme sonucunda PSO ve MSO sırasıyla 48. ve 83. yinelemede nihai yakınsama değerine ulaşırken, RHO henüz son değerlerini almamıştır.

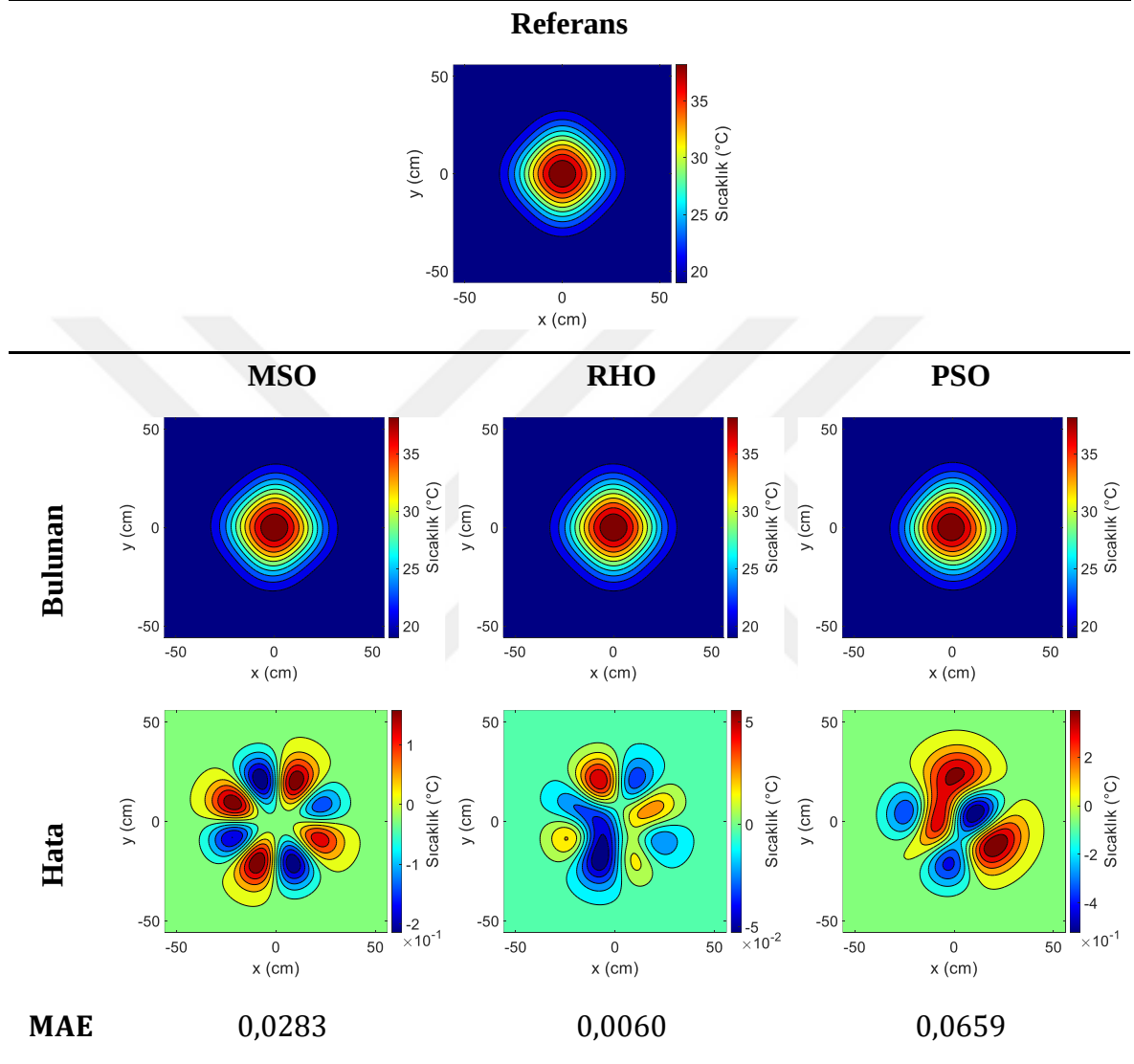
Beş ısıtıcılı dizi için oluşturulan ikinci referans modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-14, 0)$, ikinci ısıtıcı $(0, 0)$, üçüncü ısıtıcı $(14, 0)$, dördüncü ısıtıcı $(0, 14)$, beşinci ısıtıcı $(0, -14)$ ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafe $z = 110$ cm olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda MSO, RHO ve PSO algoritmalarından elde edilen ısıtma ve hata modellerine ait kontur grafikleri Tablo 37’de verilmiştir. Tablo 37’de optimizasyon algoritmalarının referans modeli bulurken oluşan MAE değerleri de sunulmuştur.

Tablo 37 incelendiğinde üç optimizasyon algoritmasının da referans modeli başarılı bir şekilde elde edebildiği görülmektedir. RHO, referans modeli en küçük MAE değeri ile belirleyerek en başarılı algoritma olmuştur. Hata modellerinden elde edilen sonuçlara göre, RHO’da, PEBH değeri $0,0558$ °C iken NEBH değeri $0,0529$ °C’dir. İkinci MSO’nun PEBH değeri $0,1960$ °C, NEBH değeri ise $0,2149$ °C’dir. Üçüncü PSO’nun PEBH değeri $0,4861$ °C iken NEBH değeri $0,5228$ °C’dir.

Optimizasyon algoritmalarının belirledikleri xy ısıtıcı koordinatları Tablo 38’deki gibidir. Bulunan koordinatlar için MAE hesaplandığında; RHO’nun $0,24$ cm, MSO’nun $1,19$ cm ve PSO’nun $0,68$ cm hata ile referans ısıtıcı koordinatlarını belirleyebildiği

görülmüştür. Bu dizi için elde edilen genel sonuçlarda PSO sonuncu olmasına rağmen xy koordinatlarının tespit edilmesinde MSO'dan daha başarılı olmuştur.

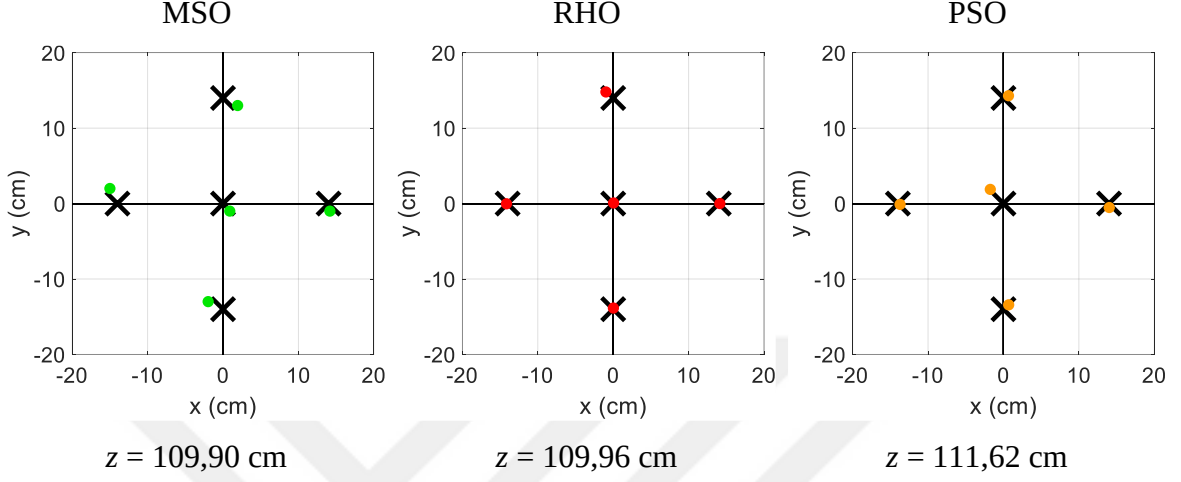
Tablo 37. Beş ısıtıcı ikinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri



Tablo 38. Beş ısıtıcı ikinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları

OA	Isıtıcı 1		Isıtıcı 2		Isıtıcı 3		Isıtıcı 4		Isıtıcı 5	
	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	x_5	y_5
Referans	-14,00	0,00	0,00	0,00	14,00	0,00	0,00	14,00	0,00	-14,00
MSO	-14,99	1,99	0,89	-0,99	14,17	-0,99	1,94	13,00	-1,97	-13,00
RHO	-14,15	-0,03	0,05	0,08	14,14	0,00	-0,97	14,79	0,03	-13,85
PSO	-13,71	-0,11	-1,75	1,88	14,03	-0,52	0,67	14,29	0,69	-13,42

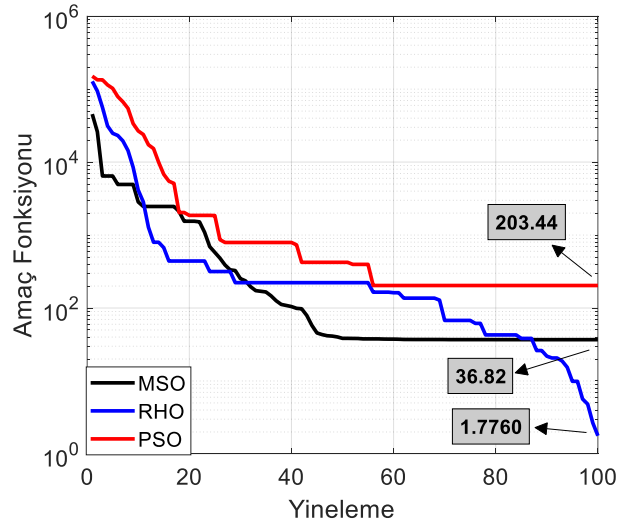
Bulunan koordinatların xy düzleminde gösterimi ve optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen z değerleri sırasıyla Şekil 60'ta verilmiştir. Burada $\times$ referans koordinatı, $\bullet$ ise bulunan koordinatı temsil etmektedir.



Şekil 60. Beş ısıtıcı ikinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları

Elde edilen sonuçlara göre RHO z değerini 0,04 cm hata ile tespit etmiştir. MSO'da bu değer 0,10 cm iken, PSO'da 1,62 cm olmuştur.

Optimizasyon algoritmalarının yakınsama grafikleri Şekil 61'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu için en iyi uygunluk değerini RHO'nun elde ettiği görülürken, ikinci ve üçüncü en iyi uygunluk değerine sahip algoritmalar sırasıyla MSO ve PSO olmuştur.



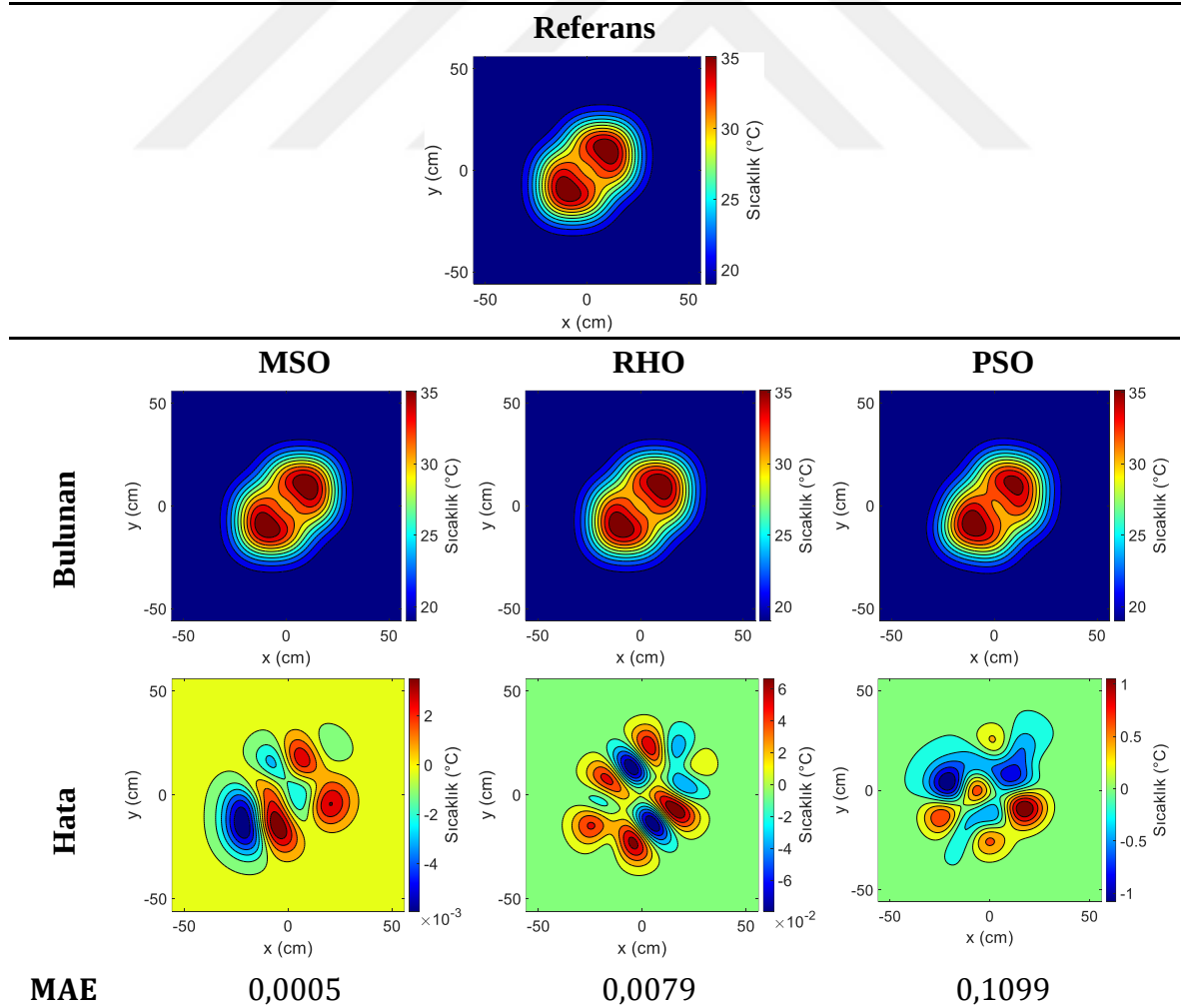
Şekil 61. Beş ısıtıcı ikinci dizi için yakınsama grafikleri

100 yineleme sonucunda PSO ve MSO sırasıyla 56. ve 89. yinelemede nihai yakınsama değerine ulaşırken, RHO henüz son değerlerini almamıştır.

2.6.5. Altı Isıtıcılı Diziler için Oluşturulan Uyarlanabilir Isıtma Modelleri

Altı ısıtıcılı dizi için oluşturulan ilk referans modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(0, -14)$, ikinci ısıtıcı $(-14, -14)$, üçüncü ısıtıcı $(14, 14)$, dördüncü ısıtıcı $(14, 0)$, beşinci ısıtıcı $(-14, 0)$, altıncı ısıtıcı $(0, 14)$ ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafe $z = 90$ cm olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda MSO, RHO ve PSO algoritmalarından elde edilen ısıtma ve hata modellerine ait kontur grafikleri Tablo 39’da verilmiştir. Tablo 39’da optimizasyon algoritmalarının referans modeli bulurken oluşan MAE değerleri de sunulmuştur.

Tablo 39. Altı ısıtıcılı birinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri



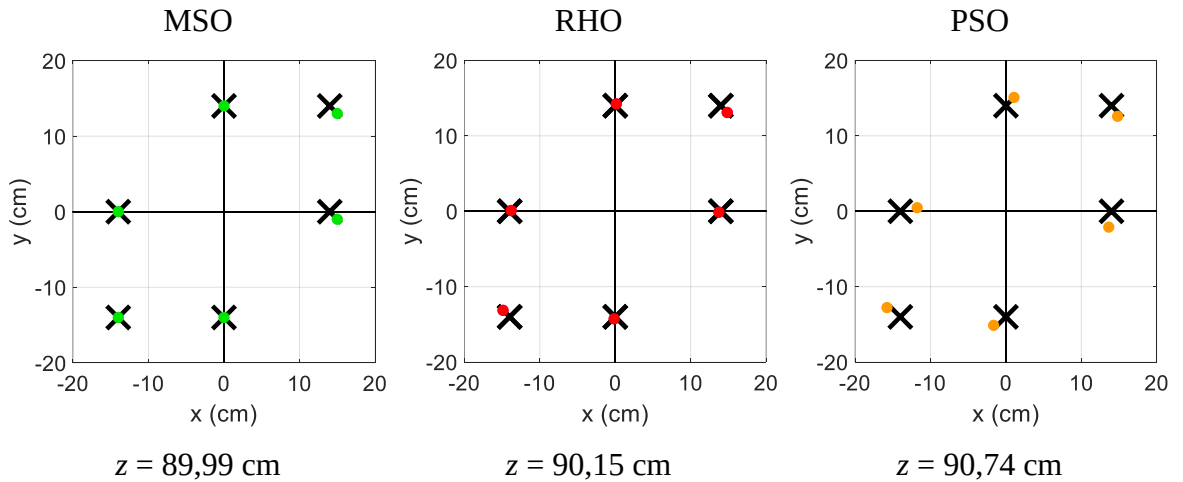
Tablo 39 incelendiğinde MSO ve RHO'nun referans modeli başarılı bir şekilde elde edebildiği görülürken, PSO'da modelin merkez noktasında oluşan hata açıkça görülmektedir. MSO, referans modeli en küçük MAE değeri ile belirleyerek en başarılı algoritma olmuştur. Hata modellerinden elde edilen sonuçlara göre, MSO'da, PEBH değeri 0,0045 °C iken NEBH değeri 0,0059 °C'dir. İkinci RHO'nun PEBH değeri 0,0811 °C, NEBH değeri ise 0,0793 °C'dir. Üçüncü PSO'nun PEBH değeri 1,2670 °C iken NEBH değeri 1,0831 °C'dir.

Optimizasyon algoritmalarının belirledikleri xy ısıtıcı koordinatları Tablo 40'taki gibidir. Bulunan koordinatlar için MAE hesaplandığında; MSO'nun 0,33 cm, RHO'nun 0,41 cm ve PSO'nun 1,28 cm hata ile referans ısıtıcı koordinatlarını belirleyebildiği görülmüştür.

Tablo 40. Altı ısıtıcılı birinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları

OA	Isıtıcı 1		Isıtıcı 2		Isıtıcı 3		Isıtıcı 4		Isıtıcı 5		Isıtıcı 6	
	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	x_5	y_5	x_6	y_6
Referans	0,00	-14,00	-14,00	-14,00	14,00	14,00	14,00	0,00	-14,00	0,00	0,00	14,00
MSO	-0,00	-14,00	-13,99	-13,99	14,99	13,00	14,99	-0,99	-13,99	0,00	0,00	14,01
RHO	-0,14	-14,26	-14,88	-13,14	14,85	13,10	13,75	-0,12	-13,80	0,10	0,12	14,24
PSO	-1,63	-15,13	-15,77	-12,77	14,81	12,59	13,64	-2,09	-11,76	0,47	1,07	15,09

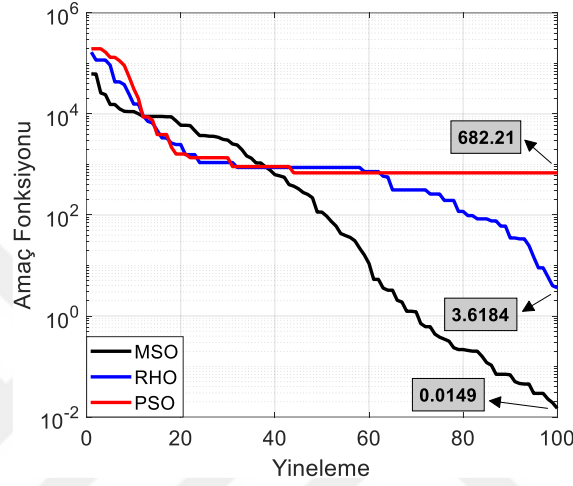
Bulunan koordinatların xy düzleminde gösterimi ve optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen z değerleri sırasıyla görsel ve sayısal olarak Şekil 62'de verilmiştir. Burada $\times$ referans koordinatı, $\bullet$ ise bulunan koordinatı temsil etmektedir.



Şekil 62. Altı ısıtıcılı birinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları

Elde edilen sonuçlara göre MSO z değerini 0,01 cm hata ile tespit etmiştir. RHO'da bu değer 0,15 cm iken, PSO'da 0,74 cm olmuştur.

Optimizasyon algoritmalarının yakınsama grafikleri Şekil 63'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu için en iyi uygunluk değerini MSO'nun elde ettiği görülürken, ikinci ve üçüncü en iyi uygunluk değerine sahip algoritmalar sırasıyla RHO ve PSO olmuştur.



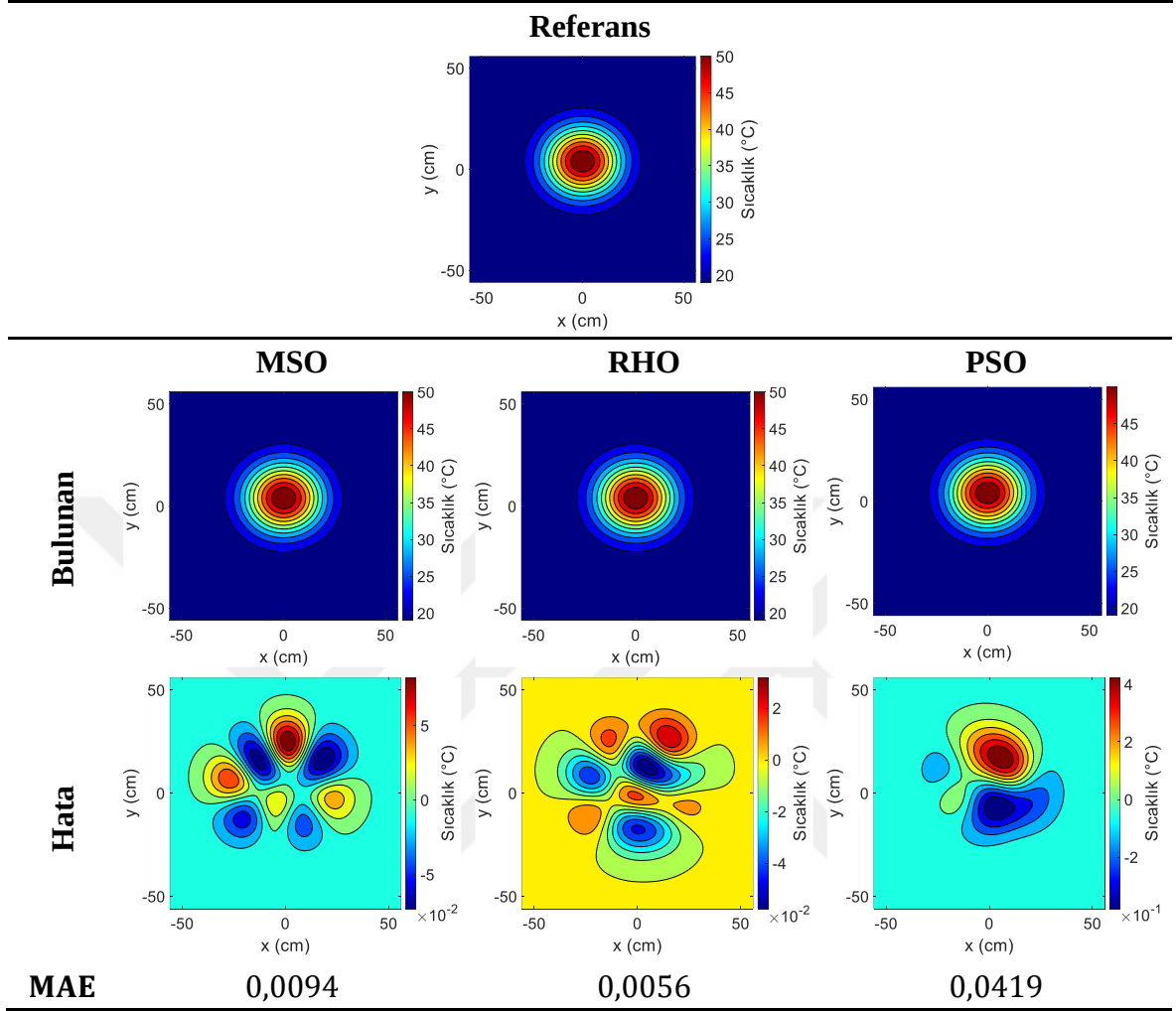
Şekil 63. Altı ısıtıcılı birinci dizi için yakınsama grafikleri

100 yineleme sonucunda PSO 48. yinelemede nihai yakınsama değerine ulaşırken, MSO ve RHO henüz son değerlerini almamıştır.

Altı ısıtıcılı dizi için oluşturulan ikinci referans modelin koordinatları birinci ısıtıcı $(-8, 8)$, ikinci ısıtıcı $(8, 8)$, üçüncü ısıtıcı $(8, 0)$, dördüncü ısıtıcı $(0, 0)$, beşinci ısıtıcı $(0, 8)$, altıncı ısıtıcı $(-8, 0)$ ve ısıtıcılar ile algılayıcı dizisi arasındaki mesafe $z = 120$ cm olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda MSO, RHO ve PSO algoritmalarından elde edilen ısıtma ve hata modellerine ait kontur grafikleri Tablo 41'de verilmiştir. Tablo 41'de optimizasyon algoritmalarının referans modeli bulurken oluşan MAE değerleri de verilmiştir.

Tablo 41 incelendiğinde üç optimizasyon algoritmasının da referans modeli başarılı bir şekilde elde edebildiği görülmektedir. RHO, referans modeli en küçük ortalama MAE değeri ile belirleyerek en başarılı algoritma olmuştur. Hata modellerinden elde edilen sonuçlara göre, RHO'da, PEBH değeri 0,0318 °C iken NEBH değeri 0,0576 °C'dir. İkinci MSO'nun PEBH değeri 0,0978 °C, NEBH değeri ise 0,0731 °C'dir. Üçüncü PSO'nun PEBH değeri 1,5036 °C iken NEBH değeri 0,3793 °C'dir.

Tablo 41. Altı ısıtıcı ikinci referans dizi için ısıtma ve hata modelleri

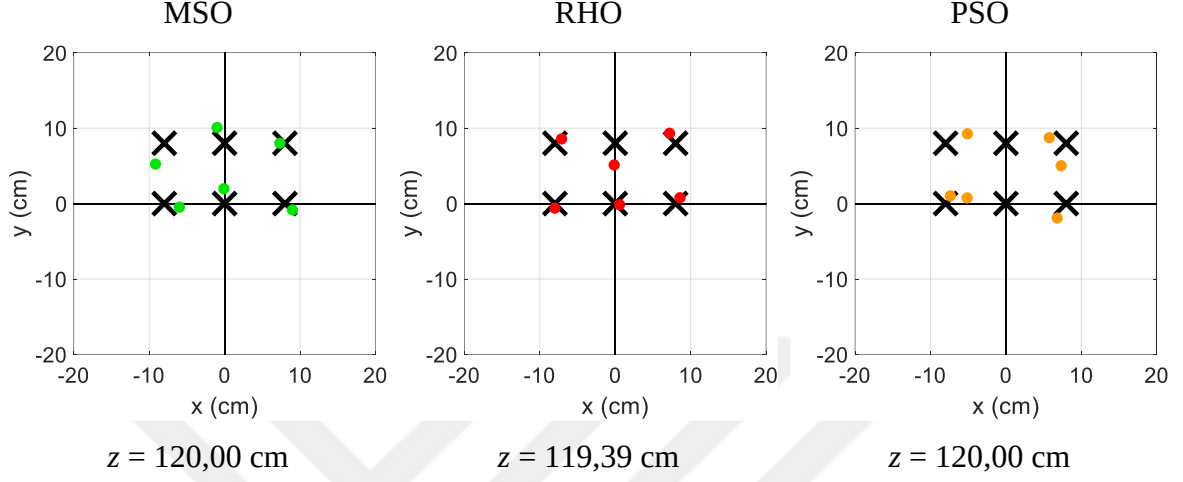


Optimizasyon algoritmalarının belirledikleri xy ısıtıcı koordinatları Tablo 42’deki gibidir. Bulunan koordinatlar için MAE hesaplandığında; RHO’nun 0,77 cm, MSO’nun 1,17 cm ve PSO’nun 2,24 cm hata ile referans ısıtıcı koordinatlarını tespit edebildiği görülmüştür. Algoritmalar, xy koordinatlarındaki en büyük hata değerlerine bu referans modelde ulaşmıştır.

Tablo 42. Altı ısıtıcı ikinci referans dizi için bulunan ısıtıcı koordinatları

OA	Isıtıcı 1		Isıtıcı 2		Isıtıcı 3		Isıtıcı 4		Isıtıcı 5		Isıtıcı 6	
	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	x_5	y_5	x_6	y_6
Referans	-8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	-8,00	0,00
MSO	-9,16	5,23	7,33	7,99	8,99	-0,85	-0,09	1,97	-0,99	10,08	-5,99	-0,47
RHO	-7,11	8,57	7,21	9,32	8,58	0,77	0,57	-0,15	-0,14	5,12	-8,01	-0,61
PSO	-5,10	9,25	7,32	5,02	6,80	-1,91	-5,12	0,754	5,76	8,74	-5,14	0,75

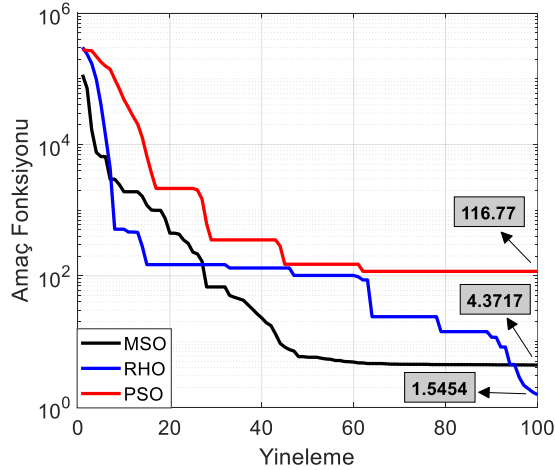
Bulunan koordinatların xy düzleminde gösterimi ve optimizasyon algoritmaları tarafından belirlenen z değerleri sırasıyla Şekil 64'te verilmiştir. Burada $\times$ referans koordinatı, $\bullet$ ise bulunan koordinatı temsil etmektedir.



Şekil 64. Altı ısıtıcı ikinci dizi için referans ve bulunan ısıtıcı koordinatları

Sonuçlar incelendiğinde RHO z değerini 0,61 cm hata ile tespit etmiştir. MSO ve PSO'da bu değer 0,00 cm olmuştur. Bu dizi özelinde MSO ve PSO z koordinatının tespit edilmesinde RHO'dan daha başarılı olmuştur.

Optimizasyon algoritmalarının yakınsama grafikleri Şekil 65'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu için en iyi uygunluk değerini RHO'nun elde ettiği görülürken, ikinci ve üçüncü en iyi uygunluk değerine sahip algoritmalar sırasıyla MSO ve PSO olmuştur.



Şekil 65. Altı ısıtıcı ikinci dizi için yakınsama grafikleri

100 yineleme sonucunda PSO 62. yinelemede nihai yakınsama değerine ulaşırken, MSO ve RHO henüz son değerlerini almamıştır.

Optimizasyon sonuçlarının özeti Tablo 43'te verilmiştir. Tabloda kalın punto ile yazılan değerler en iyi sonucu belirtmektedir.

Tablo 43. Optimizasyon sonuçlarının kıyaslanması

Isıtıcı Sayısı	Dizi	MSO		RHO		PSO	
		MAE	SSE	MAE	SSE	MAE	SSE
2	1	0,0000	$6,84 \times 10^{-3}$	0,0006	0,1528	0,0171	100,28
	2	0,0000	$7,25 \times 10^{-17}$	0,0006	0,0759	0,0063	9,2800
3	1	0,0000	$7,02 \times 10^{-6}$	0,0025	1,0683	0,0380	307,00
	2	0,0000	$2,53 \times 10^{-4}$	0,0013	0,2269	0,0103	21,060
4	1	0,0275	103,57	0,0083	9,3178	0,0305	129,50
	2	0,0000	$4,07 \times 10^{-5}$	0,0030	0,4525	0,0367	59,330
5	1	0,0403	160,08	0,0052	2,6142	0,0673	404,66
	2	0,0283	36,820	0,0060	1,7760	0,0659	203,44
6	1	0,0005	0,0149	0,0079	3,6184	0,1099	682,21
	2	0,0094	4,3717	0,0056	1,5424	0,0419	116,77

Tablo 43'te de görüldüğü üzere iki ve üç ısıtıcılı dizilerde en düşük MAE ve SSE değerini MSO elde ederken, beş ısıtıcılı dizilerde ise RHO elde etmiştir. Dört ve altı ısıtıcılı dizilerde ise her iki referans dizinin birinde MSO, diğerinde ise RHO daha iyi sonuç vermiştir. PSO sıralamada sonuncu olmasına rağmen MAE değeri en yüksek 0,1099 olacak şekilde tüm dizilerde referans modeli belirleyebilmiştir.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, elde edilen sonuçlar, MSO, RHO ve PSO'nun ısıtıcı konumlarını ve ısıtıcı-algılayıcı dizisi arasındaki mesafeyi başarıyla tespit ettiğini ve uyarlanabilir ısıtma modellerinin çıkarılmasına olanak sağladığını göstermiştir.

3. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında elektrikli ısıtıcıların ısıtma ve matematiksel modellerinin çıkarılması ve uyarlanabilir ısıtma modellerinin oluşturulmasında kullanılacak yeni bir sıcaklık ölçüm sistemi tanıtılmıştır. Ölçüm sistemi Autodesk Fusion 360 programı ile üç boyutlu olarak tasarlanmış ve tasarıma uygun olarak Şekil 15'te verildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sisteminde kullanılan 81 adet PT100 sıcaklık algılayıcı devresi xy düzleminde 9×9 düzeninde matris oluşturacak şekilde konumlandırılmıştır. Ölçüm tablası üzerine yerleştirilen ısıtıcının (veya ısıtıcıların) z ekseninde [10, 120] cm aralığında 10 cm'lik adımlarla algılayıcı dizisine doğru hareket ettirilmesi ile üç boyutlu ısıtma modelleri elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca PT100 sıcaklık algılayıcısı ve STM32F407 mikrodenetleyicisi kullanılarak yapılacak sıcaklık ölçümleri için yeni bir algılayıcı devresi önerilmiştir. Önerilen devrenin sıcaklık ölçümlerini $0,0489\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyetinde yüksek doğruluk ve kararlılıkla gerçekleştirdiği elde edilen sonuçlardan görülmüştür.

Ölçüm sisteminde yapılan deneysel çalışmalarda ısıtıcı olarak 1400 W gücünde fanlı ısıtıcılar kullanılmıştır. İlk olarak ısıtıcının matematiksel modelinin elde edilmesi için ısıtıcı ölçüm tablasının orta noktasına yerleştirilmiş ve yapılan ölçümler ile ısıtıcının z ekseninde algılayıcı dizisi ile olan mesafesine bağlı olarak ısıtma modelleri elde edilmiştir. Elde edilen bu ısıtma modellerinin Gauss dağılımına benzerliğinden faydalanılarak ısıtıcının matematiksel modeli çıkarılmıştır. Tek ısıtıcı için ölçüm sonuçları ve matematiksel modelden elde edilen ısıtma modelleri karşılaştırıldığında matematiksel modelin doğruluğu sonuçlardan açıkça görülmektedir. Buna göre 12 ısıtma modeli için performans değerlendirme metriklerinin ortalama değerleri hesaplandığında, $\text{MAE} = 0,1791\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{RMSE} = 0,2085\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{SSE} = 702,54\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ ve $\text{R}^2 = \%99,21$ olarak bulunmuştur.

Çalışmada farklı sayıda ısıtıcı içeren değişken dizilime sahip ısıtıcı dizileri kullanılarak matematiksel modelin başarımlı analizi yapılmıştır. Buna göre ikili, üçlü, dördü, beşli ve altılı ısıtıcıların her biri için üç farklı dizilim yapısı kullanılarak oluşturulan toplamda 15 diziden ölçümler alınmış ve ısıtma modelleri çıkarılmıştır. Aynı diziler kullanılarak matematiksel modelden elde edilen ısıtma modelleri ile ölçüm sonuçları kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 180 ısıtma modeli için ortalama değerler dikkate

alındığında, $MAE = 0,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $R^2 = \%98,18$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar matematiksel modelin performans ve etkinliğini kanıtlar niteliktedir.

Matematiksel modelin doğruluğu ölçüm sonuçları ile ispat edildikten sonra ölçüm sistemine ihtiyaç duymadan uyarlanabilir ısıtma modellerinin oluşturulması için optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Buna göre ikili, üçlü, dördü, beşli ve altılı ısıtıcıların her biri için iki farklı dizi yapısı kullanılarak oluşturulan 10 referans model için optimizasyon algoritmaları çalıştırılmış ve elde edilen ısıtma modelleri referans model ile karşılaştırılarak optimizasyon algoritmalarının başarımları kıyaslanmıştır. MAE ve SSE metrikleri kullanılarak elde edilen bulgular, optimizasyon algoritmalarının referans modelleri başarılı bir şekilde oluşturabildiğini ortaya koymuştur. MSO, 10 referans modelin altısında RHO ve PSO'ya göre daha iyi yakınsama ve hata değeri elde ederek en başarılı optimizasyon algoritması olmuştur. Geriye kalan dört referans modelde ise RHO en iyi sonuçları elde ederken, PSO'nun en iyi olduğu bir senaryo olmamıştır. MSO birey boyutunun (ısıtıcı sayısının) az olduğu (5 ve 7 boyutlu referans modeller) daha başarılı olurken, RHO birey boyutu arttıkça (11 boyutlu referans modeller) diğer algoritmalara göre daha iyi yakınsama sağlamıştır. Özetlemek gerekirse optimizasyon sonuçları, MSO, RHO ve PSO'nun ısıtıcı konumları ve ısıtıcı-algılayıcı dizisi arasındaki mesafeyi başarılı bir şekilde tespit ederek uyarlanabilir ısıtma modellerinin elde edilmesine olanak sağladığını göstermiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar fanlı ısıtıcının ısıtma modellerinin elde edilmesi ve matematiksel ifadesinin çıkarılmasında gerçekleştirilen ölçüm sisteminin başarısını ortaya koymuştur. Sistemin elektrikli ısıtıcıların üretim sürecine yeni bir bakış açısı getireceği düşünülmektedir. Isıtıcıların tasarım, üretim ve test aşamalarında ölçüm sisteminin kullanılmasıyla daha verimli, ekonomik ve homojen ısıtma yapabilen ısıtıcıların üretilmesinin önü açılacaktır. Daha verimli ısıtma ile enerjiye olan talep düşeceği için doğal kaynakların korunması ve karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlanacaktır. Ölçüm sistemi kullanılarak ısıtıcılardan belirli periyotlarla alınan ölçümlerle kullanım ömrü ve uzun süreli kullanımlarda oluşacak performans kaybı gibi bilgilerin de elde edilmesi mümkün olacaktır. Nitekim zamanla performansı düşen ısıtıcı daha fazla enerji tüketerek uzun vadede enerji tüketim maliyetini artıracaktır. Aynı zamanda tüketiciler ısıtıcıların katalog bilgilerinde yer alacak ısıtma modellerinden faydalanarak daha bilinçli ve çözüm odaklı ısıtıcı seçimi yapabileceklerdir.

4. ÖNERİLER

Gerçekleştirilen ölçüm sisteminde bulunabilirliği ve uygun maliyeti nedeniyle PT100 sıcaklık algılayıcısı ve ölçüm hassasiyetini artırmaya yardımcı olması amacıyla da AD623 fark yükselteci kullanılmıştır. Ancak ölçüm doğruluğu için algılayıcı devresinin yüksek hassasiyetli olarak tasarlanması kablo ve kontak dirençlerindeki değişimin sıcaklık ölçümü üzerindeki bozucu etkisini artırmıştır. Bu etkiyi azaltmak için PT100 yerine 0 °C'deki direnç değeri 1000 Ω olan PT1000 sıcaklık algılayıcısı kullanılabilir. Ayrıca algılayıcı devreleri robotik dizge yöntemi ile üretilerek bu sorun ortadan kaldırılabilir.

Gerçekleştirilen ölçüm sisteminde 140 mm aralıklar ile 9 × 9 matris düzeninde yerleştirilmiş 81 sıcaklık algılayıcı devresi bulunmaktadır. Isıtma modelinin çözünürlüğünü ve doğruluğunu artırmak için algılayıcılar arasındaki uzaklık azaltılabilir ve algılayıcı devreleri 12 × 12 veya 16 × 16 matris diziliminde konumlandırılabilir.

Ölçüm yapılırken ısıtıcının algılayıcı dizisine olan uzaklığı manuel olarak ayarlanmaktadır ve bu durum ölçüm sürecinin uzamasına yol açmaktadır. Bunu yerine sonsuz vida sistemi ve sayısal konum kontrolü ile ısıtıcı-algılayıcı dizisi arasındaki uzaklık milimetrik olarak ayarlanabilir ve z ekseninde daha hassas ve hızlı sıcaklık ölçümleri alınabilir.

Uyarlanabilir ısıtma modellerinin elde edilmesinde PSO, RHO ve MSO algoritmalarının en temel versiyonları kullanılmıştır. Referans modelin daha hassas ve doğru bir şekilde belirlenebilmesi için bu algoritmaların varyantları veya hibrit modelleri ele alınabilir. Ayrıca literatürde yer alan diğer optimizasyon yöntemleri de kullanılarak çalışmadaki model için etkinlikleri araştırılabilir.

Bu çalışmada fanlı bir ısıtıcı için modelleme yapılmıştır. Benzer şekilde günlük hayatta kullanılan seramik veya kızılötesi ısıtıcılar için de ölçümler alınarak matematiksel modelleri elde edilebilir ve bu ısıtıcılar için de uyarlanabilir ısıtmanın mümkün olup olmadığı araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Afandi, A., Catrawedarma, I. G. N. B., & Wijayanta, S. (2024). The Development of the Ultrasonic Flowmeter Sensors for Mass Flow Rate Measurement: A Comprehensive Review. *Flow Measurement and Instrumentation*, 102614.
- Akima, H. (1970). A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures. *Journal of the ACM (JACM)*, 17(4), 589-602.
- Aranzabal, N., Martos, J., Steger, H., Blum, P., & Soret, J. (2018). Novel Instrument for Temperature Measurements in Borehole Heat Exchangers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(4), 1062-1070.
- Arun, P. V. (2013). A Comparative Analysis of Different DEM Interpolation Methods. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16(2), 133-139.
- Aryal, A., & Becerik-Gerber, B. (2019). A Comparative Study of Predicting Individual Thermal Sensation and Satisfaction Using Wrist-Worn Temperature Sensor, Thermal Camera and Ambient Temperature Sensor. *Building and Environment*, 160, 106223.
- Ayyappan, G. S., Babu, B. R., Raghavan, M. R., & Poonthalir, R. (2023). Genetic Algorithm & Fuzzy Logic-Based Condition Monitoring of Induction Motor Through Estimated Motor Losses. *IETE Journal of Research*, 69(6), 3750-3761.
- Bajzek, T. J. (2005). Thermocouples: A Sensor for Measuring Temperature. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 8(1), 35-40.
- Bazzo, J. P., Mezzadri, F., Da Silva, E. V., Pipa, D. R., Martelli, C., & Da Silva, J. C. C. (2015). Thermal Imaging of Hydroelectric Generator Stator Using A DTS System. *IEEE Sensors Journal*, 15(11), 6689-6696.
- Bhattacharya, M., & Basak, T. (2023). Can the Container-Dielectrics Control Heating Patterns for Microwave Assisted Material Processing? A Finite Element Based Introspection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 205, 123684.
- Billard, M. W., Basantani, H. A., Horn, M. W., & Gluckman, B. J. (2016). A Flexible Vanadium Oxide Thermistor Array for Localized Temperature Field Measurements in Brain. *IEEE Sensors Journal*, 16(8), 2211-2212.
- Bloch, V., Barchilon, N., Halachmi, I., & Druyan, S. (2020). Automatic Broiler Temperature Measuring by Thermal Camera. *Biosystems Engineering*, 199, 127-134.
- Bogar, M. N., Shirodkar, I. D., Kulkarni, O., Jawade, S., & Kakandikar, G. (2024). Mayfly Optimization Algorithm: A Review. *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering*, 5(1), 17-30.

- Bouderbala, K., Nouria, H., Girault, M., Videcoq, E., & Salgado, J. A. (2015). Effects of Thermal Drifts on The Calibration of Capacitive Displacement Probes at the Nanometer Level of Accuracy. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(11), 3062-3074.
- Cameron, A. C., & Windmeijer, F. A. (1997). An R-Squared Measure of Goodness of Fit for Some Common Nonlinear Regression Models. *Journal of Econometrics*, 77(2), 329-342.
- Caruso, C., & Quarta, F. (1998). Interpolation Methods Comparison. *Computers & Mathematics with Applications*, 35(12), 109-126.
- Chi, T., Park, J. S., Butts, J. C., Hookway, T. A., Su, A., Zhu, C., Styczynski, M., Todd, C., & Wang, H. (2015). A Multi-Modality CMOS Sensor Array for Cell-Based Assay and Drug Screening. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 9(6), 801-814.
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The Coefficient of Determination R-Squared is More Informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in Regression Analysis Evaluation. *Peerj Computer Science*, 7, e623.
- Draper, C., Reichle, R., de Jeu, R., Naeimi, V., Parinussa, R., & Wagner, W. (2013). Estimating Root Mean Square Errors in Remotely Sensed Soil Moisture Over Continental Scale Domains. *Remote Sensing of Environment*, 137, 288-298.
- Escribano, M. M., Solano, M. G., de la Parra Laita, Í., Alvarez, J. M., Marroyo, L., & Pigueiras, E. L. (2018). Module Temperature Dispersion Within A Large PV Array: Observations at the Amareleja PV Plant. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(6), 1725-1731.
- Fekkak, B., Menaa, M., Loukriz, A., & Kouzou, A. (2021). Control of Grid-Connected PMSG-Based Wind Turbine System With Back-To-Back Converters Topology Using a New PIL Integration Method. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(6), 12882.
- Frost, D. L., Clemenson, J. M., Goroshin, S., Zhang, F., & Soo, M. (2021). Thermocouple Temperature Measurements in Metalized Explosive Fireballs. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 46(6), 899-911.
- Gad, A. G. (2022). Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review. *Archives of computational methods in engineering*, 29(5), 2531-2561.
- Gaspar, G., Dudak, J., Mikolajcikova, M., & Gurin, D. (2023). Proposal of a Skin Temperature Measurement System Based on Digital Thermometers. *IEEE Access*, 11, 25050-25062.

- Ge, Q., & Wen, C. (2014). Fire Localization Based on Range-Range-Range Model for Limited Interior Space. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(9), 2223-2237.
- Géczy, A., Péter, Z., & Illyefalvi-Vitéz, Z. (2011). 3D Thermal Profiling of an Experimental Vapour Phase Soldering Station. In *Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology*, s. 89-93, Trátanska Lomnica.
- Goodman, N. R. (1963). Statistical Analysis Based on a Certain Multivariate Complex Gaussian Distribution (An Introduction). *The Annals of Mathematical Statistics*, 34(1), 152-177.
- Hariharan, P., Dibaji, S. A. R., Banerjee, R. K., Nagaraja, S., & Myers, M. R. (2014). Localization of Focused-Ultrasound Beams in a Tissue Phantom, Using Remote Thermocouple Arrays. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 61(12), 2019-2031.
- Hmidet, A., & Boubaker, O. (2020). Real-Time Low-Cost Speed Monitoring and Control of Three-Phase Induction Motor via a Voltage/Frequency Control Approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020(1), 6913813.
- Hodson, T. O., Over, T. M., & Foks, S. S. (2021). Mean Squared Error, Deconstructed. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(12), e2021MS002681.
- Hritonenko, N. V., & Yatsenko, Y. P. (2013). *Applied Mathematical Modelling of Engineering Problems*. New York: Springer Science & Business Media.
- Hwang, J. K. (2023). Comparison of Thermal Behaviors of Carbon and Stainless Steel Billets During the Heating Process. *Materials*, 17(1), 183.
- Ivanov, V. V., Markelov, V. A., Novikov, M. A., Ustavshikov, S. S., Volkov, P. V., & Kwon, I. B. (2006). Multichannel Temperature Sensing by Differential Coherence Multiplexing. *IEEE Sensors Journal*, 6(4), 982-985.
- Jain, M. K., & Grimes, C. A. (2001). A Wireless Magnetoelastic Micro-Sensor Array for Simultaneous Measurement of Temperature and Pressure. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(4), 2022-2024.
- Jakovenko, J., Werkhoven, R., Formánek, J., Kunen, J., Bolt, P., & Kulha, P. (2011). Thermal Simulation and Validation of 8W LED Lamp. *12th Intl. Conf. on Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, s. 1-4, Linz.
- Jan, B., Shams, R., Rizvi, Q. E. H., & Manzoor, A. (2021). Ohmic Heating Technology for Food Processing: A Review of Recent Developments. *Journal of Postharvest Technology*, 9(1), 20-34.

- Kalinke, I., Pusch, F., Häderle, F., & Kulozik, U. (2023). A Comparative Study of Frequency-Shifting Strategies for Uniform and Energy-Efficient Microwave Heating in Solid-State Microwave Systems. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 86, 103388.
- Kamarudin, A. N., Miryala, M., Kechik, M. M. A., Chen, S. K., Lim, K. P., Karim, M. K. A., Shabdin, M. K., & Shaari, A. H. (2024). Optimization of a Heating Pattern for Single Grain (Y, Er) Ba₂Cu₃O_{7-x} by Infiltration Growth Process. *Journal of Alloys and Compounds*, 984, 173912.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. *ICNN'95-International Conference On Neural Networks*, s. 1942-1948, Perth WA.
- Koç, H., Berzener, B. S., Yaren, T., & Kizir, S. (2021). Gerçek Zamanlı DC Motor Konum-Hız ve Konum-Hız-Tork Kaskad PID Denetleyici Performanslarının Karşılaştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(4), 985-995.
- Lindner, M., Tunc, E., Weraneck, K., Heilmeier, F., Volk, W., Jakobi, M., Koch, A. W., & Roths, J. (2018). Regenerated Bragg Grating Sensor Array for Temperature Measurements During an Aluminum Casting Process. *IEEE Sensors Journal*, 18(13), 5352-5360.
- Liu, L., Dou, Y., Wang, J., Zhao, Y., Kong, W., Ma, C., He, D., Wang, H., Zhang, H., Chang, A., & Zhao, P. (2024). Recent Advances in Flexible Temperature Sensors: Materials, Mechanism, Fabrication, and Applications. *Advanced Science*, 11(36), 2405003.
- Liu, X., Hao, X., Xue, B., Tai, B., & Zhou, H. (2020). Two-Dimensional Flame Temperature and Emissivity Distribution Measurement Based on Element Doping and Energy Spectrum Analysis. *IEEE Access*, 8, 200863-200874.
- Liu, Y., Tong, T., Han, R., Zhang, Y., Li, F., Shi, H., & Jiao, Y. (2023). Effect of Different Arrangements of Globe Particles on Radio Frequency Heating Uniformity: Using Black Pepper as an Example. *LWT*, 174, 114422.
- Liu, Z., Huo, P., Shi, C., Yan, Y., Kong, F., Cao, S., Chang, A., Wang, j., & Yao, J. (2024). Design of Temperature Measurement System Guided by Thermal Dissipation Coefficient of NTC Thermistor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 377, 115772.
- Luria, K., & Shor, J. (2010). Miniaturized CMOS Thermal Sensor Array for Temperature Gradient Measurement in Microprocessors. *In Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, s. 1855-1858, Paris.
- Mallick, M. M., Franke, L., Rösch, A. G., Hussein, M., Long, Z., Eggeler, Y. M., & Lemmer, U. (2024). High-Sensitivity Flexible Thermocouple Sensor Arrays via Printing and Photonic Curing. *Advanced Functional Materials*, 34(20), 2301681.
- Menard, S. (2001). *Applied Logistic Regression Analysis*. California: SAGE publications.

- Morana, A., Mellier, F., Cheymol, G., Destouches, C., Di Salvo, J., Girard, S., Laffont, G., & Marin, E. (2016). Irradiation Campaign in the EOLE Critical Facility of Fiber Optic Bragg Gratings Dedicated to the Online Temperature Measurement in Zero Power Research Reactors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 63(6), 2887-2894.
- Mulla, M. A. (2020). Hardware Implementation of the Cascaded H-Bridge Inverter Using ARM Cortex M4 Microcontroller. *Engineering Letters*, 28(3), 1-8.
- Murphy, A. H. (1988). Skill Scores Based on The Mean Square Error and Their Relationships to the Correlation Coefficient. *Monthly Weather Review*, 116(12), 2417-2424.
- Nagarajan, K., Rajagopalan, A., Angalaeswari, S., Natrayan, L., & Mammo, W. D. (2022). Combined Economic Emission Dispatch Of Microgrid With the Incorporation of Renewable Energy Sources Using Improved Mayfly Optimization Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022(1), 6461690.
- Nainggolan, R., Perangin-angin, R., Simarmata, E., & Tarigan, A. F. (2019). Improved the Performance of the K-Means Cluster Using the Sum of Squared Error (SSE) Optimized by Using the Elbow Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1361(1), 012015.
- Neji, B., Ferko, N., Ghandour, R., Karar, A. S., & Arbess, H. (2021). Micro-Fabricated RTD Based Sensor for Breathing Analysis and Monitoring. *Sensors*, 21(1), 318.
- Nguyen, N. T. (2002). A Novel Measurement Concept for Wind Speed and Wind Direction Based on a Temperature Sensor Array. *In Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, s. 510-514, Osaka.
- Nguyen, N. T. (2005). A Novel Thermal Sensor Concept for Flow Direction and Flow Velocity. *IEEE Sensors Journal*, 5(6), 1224-1234.
- Oiler, J., Shock, E., Hartnett, H., Dombard, A. J., & Yu, H. (2014). Harsh Environment Sensor Array-Enabled Hot Spring Mapping. *IEEE Sensors Journal*, 14(10), 3418-3425.
- Pan, Y., Liu, Y., Zheng, L., Li, Z., Wang, Y., Yang, S., & Yan, Y. (2024). Research on Temperature Field Distribution of Nitrogen Heating in Oil Shale Based on Fluent Secondary Development. *Energy*, 312, 133413.
- Panpan, Z., Bifeng, Y., Yi, Z., & Shangchang, M. (2019). A Multi-Channel Temperature Measurement and Fusion System Based on Cortex-M4. *In 2019 International Conference on Meteorology Observations*, s. 1-4, Chengdu.
- Pardhu, B. G., & Kota, V. R. (2021). Radial Movement Optimization Based Parameter Extraction of Double Diode Model of Solar Photovoltaic Cell. *Solar Energy*, 213, 312-327.

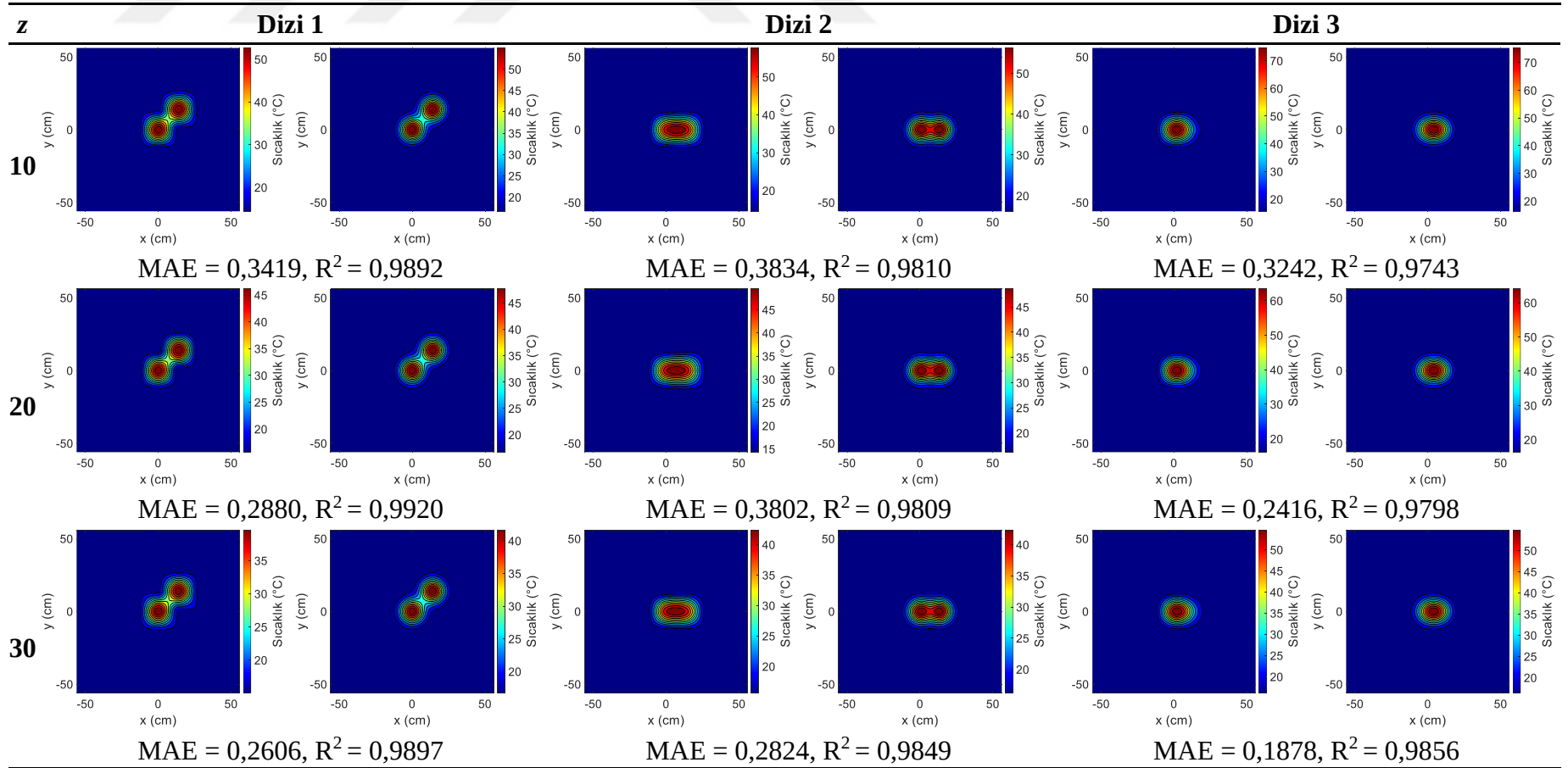
- Quarteroni, A. (2009). Mathematical Models in Science and Engineering. *Notices of the AMS*, 56(1), 10-19.
- Rahmani, R., & Yusof, R. (2014). A New Simple, Fast And Efficient Algorithm for Global Optimization over Continuous Search-Space Problems: Radial Movement Optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 248, 287-300.
- Ramirez-GarciaLuna, J. L., Bartlett, R., Arriaga-Caballero, J. E., Fraser, R. D., & Saiko, G. (2022). Infrared Thermography in Wound Care, Surgery, and Sports Medicine: A Review. *Frontiers in Physiology*, 13, 838528.
- Reich, N. G., Lessler, J., Sakrejda, K., Lauer, S. A., Iamsirithaworn, S., & Cummings, D. A. (2016). Case Study in Evaluating Time Series Prediction Models Using the Relative Mean Absolute Error. *The American Statistician*, 70(3), 285-292.
- Reigosa, D. D., Fernandez, D., Tanimoto, T., Kato, T., & Briz, F. (2016). Permanent-Magnet Temperature Distribution Estimation in Permanent-Magnet Synchronous Machines Using Back Electromotive Force Harmonics. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(4), 3093-3103.
- Russell, L., Goubran, R., & Kwamena, F. (2018). Posture Detection Using Sounds and Temperature: LMS-Based Approach to Enable Sensory Substitution. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(7), 1543-1554.
- Sagita, D., Setiaboma, W., Kristanti, D., Kurniawan, Y. R., Hidayat, D. D., Darmajana, D. A., Sudaryanto, A., & Nugroho, P. (2022). Experimental Investigation of Heating Pattern, Energy Requirement and Electrical Conductivity in a Batch Ohmic Heating System for Coffee Fermentation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 76, 102946.
- Samuk, D. C., & Çakır, O. (2023). Analysis of Multivariable Objective Functions for the PID Controller Tuned by a Radial Movement Optimization. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(1), 23-29.
- Santos, V. C. V., & Santos, T. L. M. (2022). On the Variance Propagation of Thermistor-Based Measurements With a Digital Temperature Controller. *Measurement*, 192, 110863.
- Sarkar, S. (2018). Platinum RTD Sensor Based Multi-Channel High-Precision Temperature Measurement System for Temperature Range $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ Using Single Quartic Function. *Cogent Engineering*, 5(1), 1558687.
- Schäufelbühl, A., Schneeberger, N., Munch, U., Waelti, M., Paul, O., Brand, O., Baltes, H., & Loepfe, M. (2001). Uncooled Low-Cost Thermal Imager Based on Micromachined CMOS Integrated Sensor Array. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 10(4), 503-510.

- Schreiber, J. F., Sausen, A., De Campos, M., Sausen, P. S., & Ferreira Filho, M. T. D. S. (2023). Data Imputation Techniques Applied to the Smart Grids Environment. *IEEE Access*, 11, 31931-31940.
- Shami, T. M., El-Saleh, A. A., Alswaitti, M., Al-Tashi, Q., Summakieh, M. A., & Mirjalili, S. (2022). Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 10, 10031-10061.
- Siguemoto, É. S., Gut, J. A., Dimitrakis, G., Curet, S., & Boillereaux, L. (2021). Evaluation of Microwave Applicator Design on Electromagnetic Field Distribution and Heating Pattern of Cooked Peeled Shrimp. *Foods*, 10(8), 1903.
- STMicroelectronics (2020). Discovery Kit With STM32F407VG MCU. Geneva, Switzerland.
- Sung, W. T., Chen, J. H., & Hsiao, C. L. (2014). Data Fusion for PT100 Temperature Sensing System Heating Control Model. *Measurement*, 52, 94-101.
- Tao, J., & Du, P. (2009). Application on Seepage Monitoring by Multi-Point Optical Fiber Grating Temperature Measurement System. *Second International Symposium on Information Science and Engineering*, s. 28-31, Shanghai.
- Thermocouple Instruments Ltd. (1999). *PT100 Resistance Table*. Caerphilly, UK.
- Thinsungnoena, T., Kaoungkub, N., Durongdumronchaib, P., Kerdprasopb, K., & Kerdprasopb, N. (2015). The Clustering Validity With Silhouette and Sum of Squared Errors. *Learning*, 3(7), 44-51.
- Turkani, V. S., Maddipatla, D., Narakathu, B. B., Altay, B. N., Fleming, P. D., Bazuin, B. J., & Atashbar, M. Z. (2019). Nickel Based RTD Fabricated via Additive Screen Printing Process for Flexible Electronics. *IEEE Access*, 7, 37518-37527.
- Vincent, T. A., Gulsoy, B., Sansom, J. E., & Marco, J. (2021). A Smart Cell Monitoring System Based on Power Line Communication-Optimization of Instrumentation and Acquisition for Smart Battery Management. *IEEE Access*, 9, 161773-161793.
- Wang, B., Niu, Y., Qin, X., Yin, Y., & Ding, M. (2021). Review of High Temperature Measurement Technology Based on Sapphire Optical Fiber. *Measurement*, 184, 109868.
- Wang, W., Yang, M., Yu, L., & Liu, D. (2020). Design of PT100 High-Precision Temperature Measurement Systems Based on Third-Order Model. *Ferroelectrics*, 563(1), 118-127.
- Wilcox, L. M., Mirala, A., Al Qaseer, M. T., & Donnell, K. M. (2024). Frequency Division Multiplexing and Random Phasing for Improved Uniformity in Microwave Heating Applications. In *2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, s. 1-6, Glasgow.

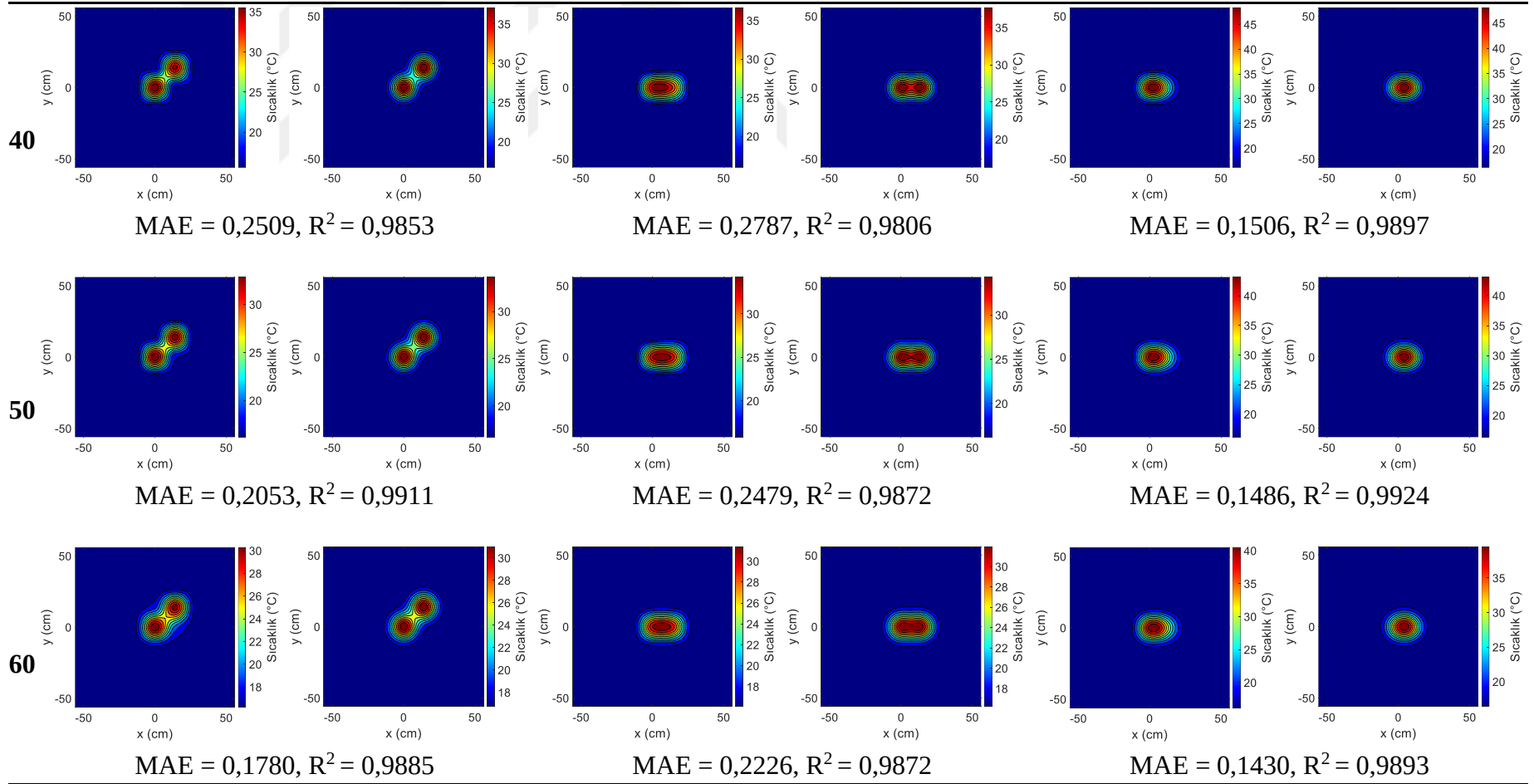
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) Over the Root Mean Square Error (RMSE) In Assessing Average Model Performance. *Climate Research*, 30(1), 79-82.
- Yang, G., & Wen, Y. (2020). A Controllable DCCS-Based PT Temperature Sensor in High Precision Molecular Spectroscopy Application. *IEEE Access*, 8, 42519-42528.
- Yang, Y., Shi, N., Zhang, R., Zhou, H., Ding, L., Tao, J., Zhang, N., & Cao, B. (2024). Study on the Effect of Local Heating Devices on Human Thermal Comfort in Low-Temperature Built Environment. *Buildings*, 14(12), 3996.
- Yuan, S. (2022). Review of Root-Mean-Square Error Calculation Methods for Large Deployable Mesh Reflectors. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2022(1), 5352146.
- Zacepins, A., & Meitalovs, J. (2014). Implementation of Multi-Node Temperature Measurement System for Bee Colonies Online Monitoring. In *Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference*, s. 695-698, Velke Karlovice.
- Zbieć, M., & Obrębski, D. (2014). The Multi-Point Pressure and Temperature Measurement System for Aerodynamic Tunnel. In *Proceedings of the 21st International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, s. 482-485, Lublin.
- Zervoudakis, K., & Tsafarakis, S. (2020). A Mayfly Optimization Algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 145, 106559.
- Zhang, P., Liang, C., Chen, X., Liu, D., & Ma, J. (2025). Insight Into Microwave Heating Patterns for Sustainable Decomposition of Plastic Wastes Into Hydrogen. *Applied Thermal Engineering*, 260, 124954.
- Zhang, S., Ren, Y., Du, Y., Zheng, J., & Deng, Z. (2018). Dynamic Liquid Nitrogen Level Detection of Cryostats Onboard the HTS Maglev Vehicle. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(2), 1-4.
- Zhang, W., Zhao, R., & Cheng, W. L. (2023). Temperature Control Performance of a Spaceborne PTC Heating System: Dynamic Modeling and Parametric Analysis. *Thermal Science and Engineering Progress*, 44, 102062.
- Zhou, B., Zuo, Y., Yang, H., Wang, S., & Hou, L. (2023). Modelling Radio Frequency Heating of Randomly Stacked Walnut Kernels With Different Particle Size. *Biosystems Engineering*, 228, 56-66.
- Zhou, X., Tang, Z., Pedrow, P. D., Sablani, S. S., & Tang, J. (2023). Microwave Heating Based on Solid-State Generators: New Insights into Heating Pattern, Uniformity, and Energy Absorption in Foods. *Journal of Food Engineering*, 357, 111650.

6. EKLER

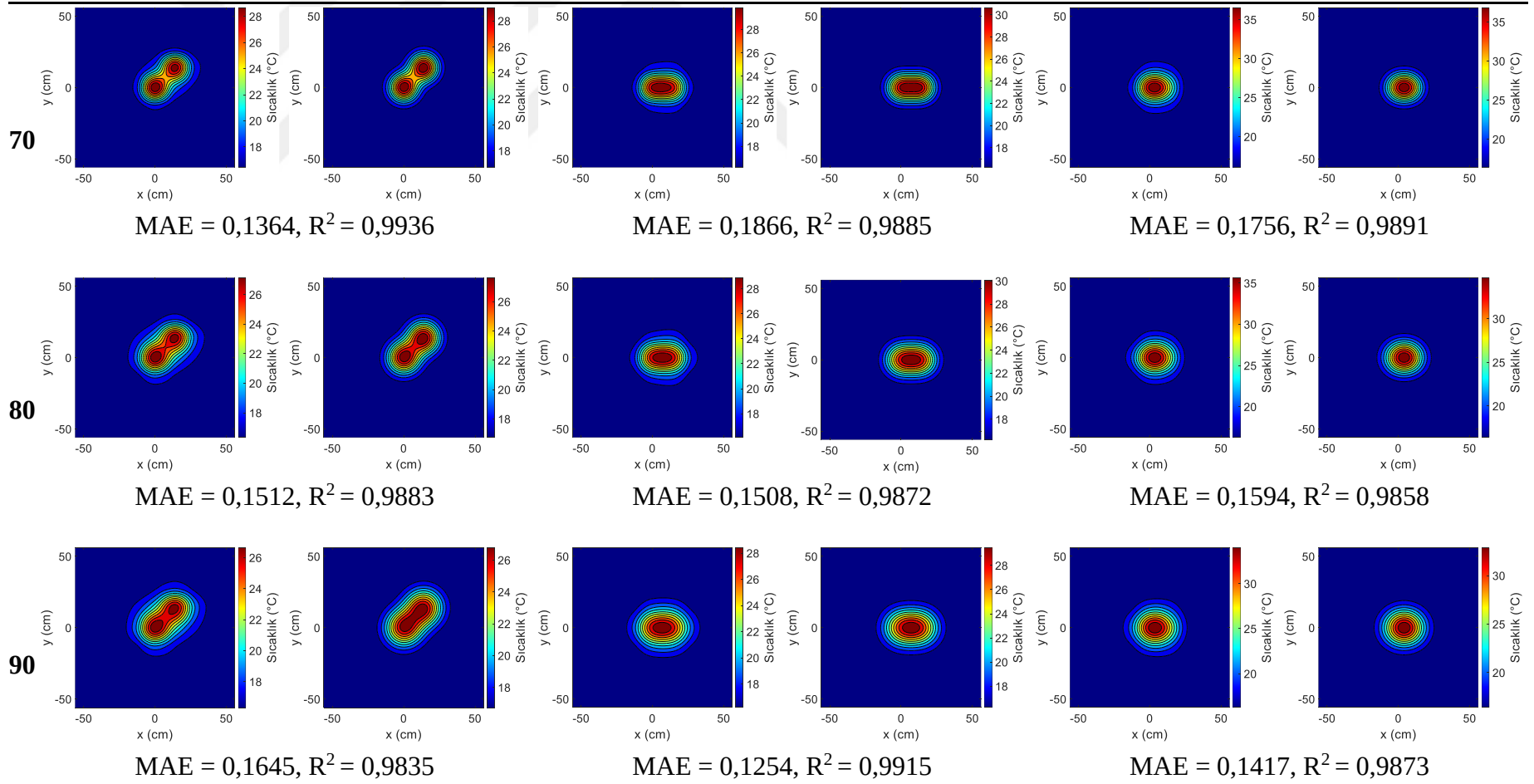
Ek Tablo 1. İki ısıtıcılı dizi sonuçları



Ek Tablo 1'in devamı

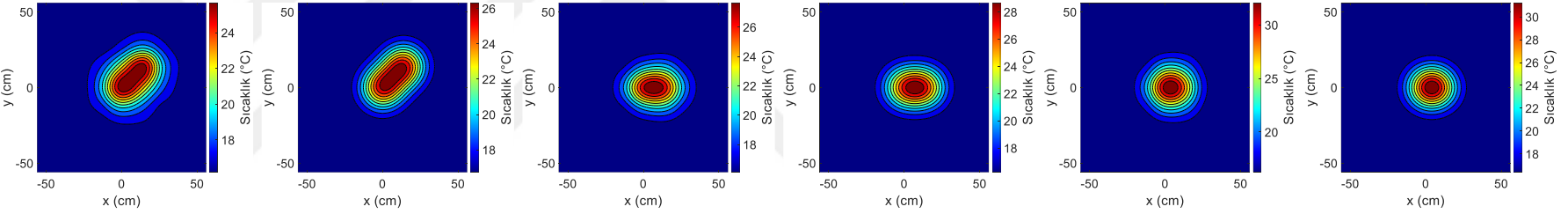


Ek Tablo 1'in devamı



Ek Tablo 1'in devamı

100

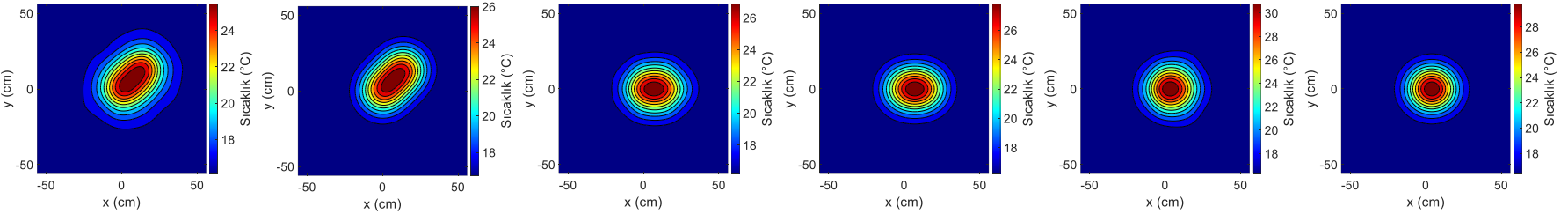


MAE = 0,1660, $R^2 = 0,9874$

MAE = 0,1276, $R^2 = 0,9885$

MAE = 0,1672, $R^2 = 0,9815$

110

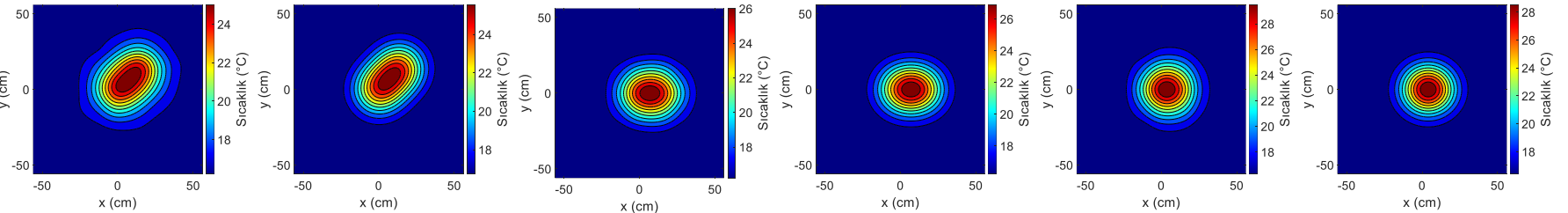


MAE = 0,1391, $R^2 = 0,9914$

MAE = 0,1121, $R^2 = 0,9921$

MAE = 0,1801, $R^2 = 0,9767$

120

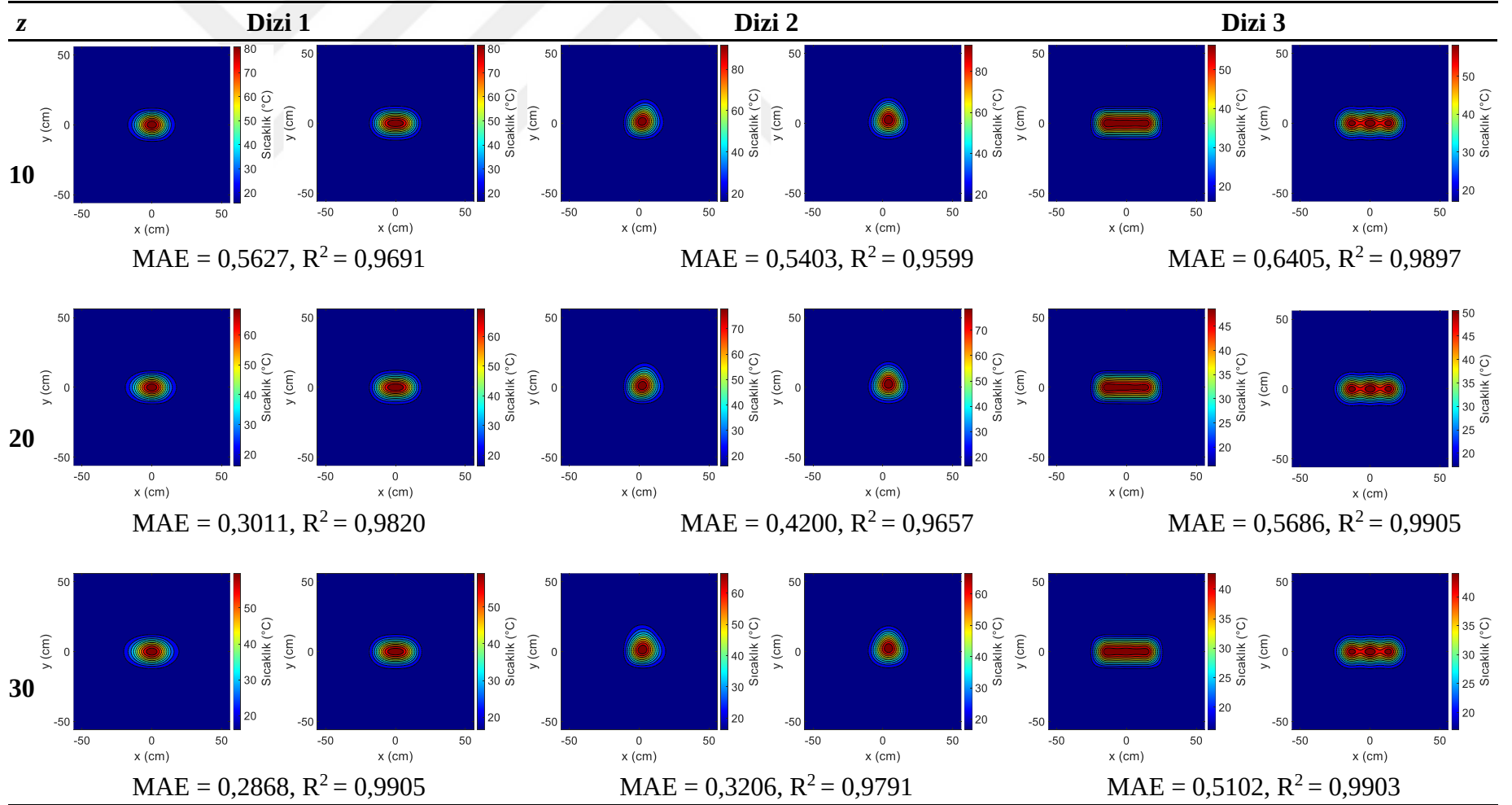


MAE = 0,1262, $R^2 = 0,9925$

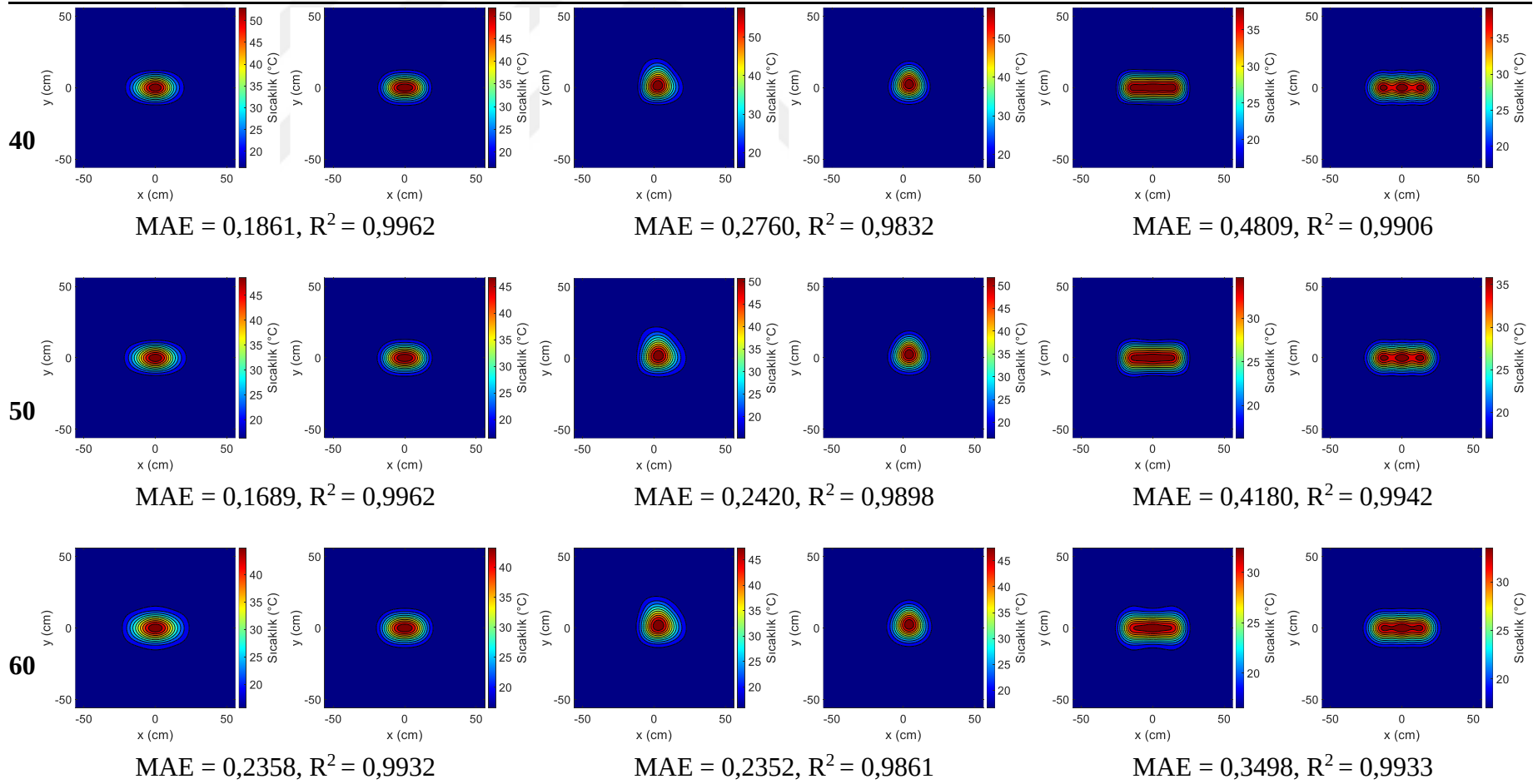
MAE = 0,1100, $R^2 = 0,9919$

MAE = 0,2200, $R^2 = 0,9686$

Ek Tablo 2. Üç ısıtıcılı dizi sonuçları

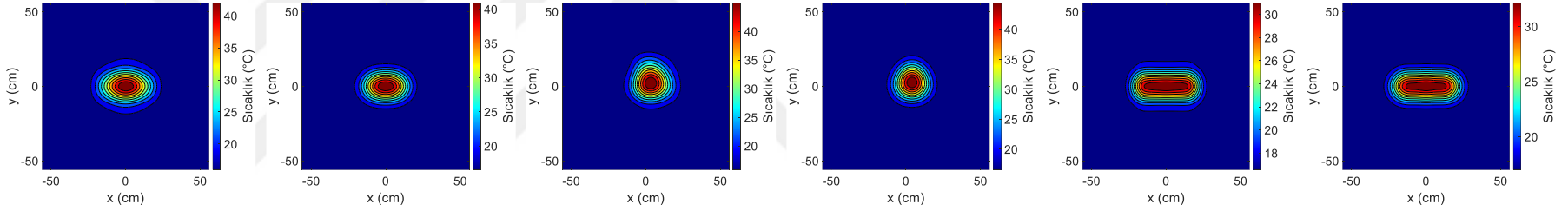


Ek Tablo 2'nin devamı



Ek Tablo 2'nin devamı

70

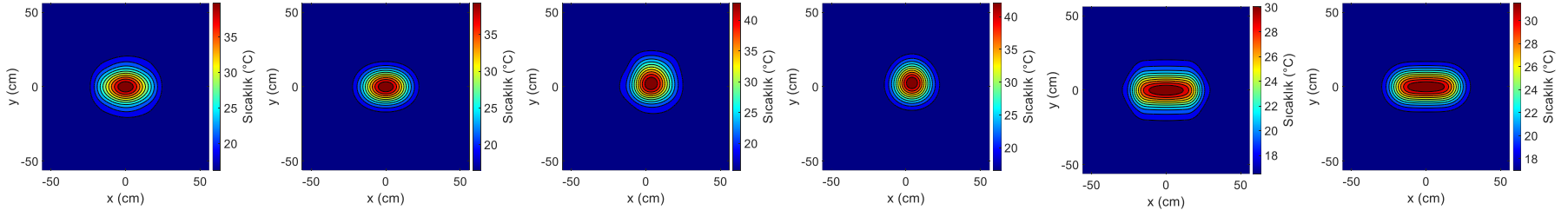


$$\text{MAE} = 0,2729, R^2 = 0,9869$$

$$\text{MAE} = 0,2265, R^2 = 0,9867$$

$$\text{MAE} = 0,3523, R^2 = 0,9921$$

80

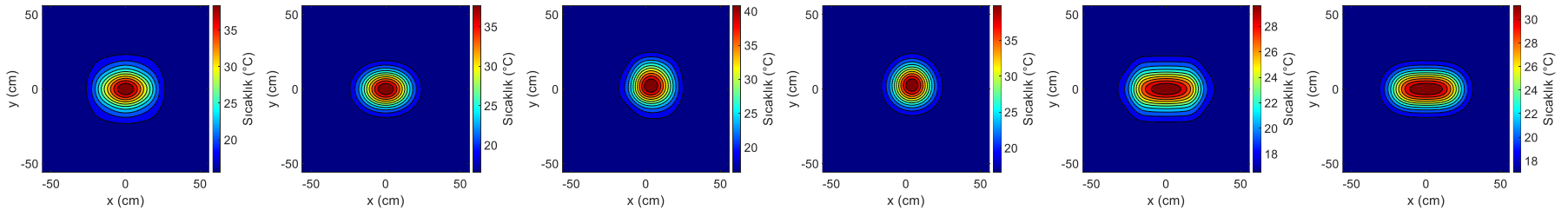


$$\text{MAE} = 0,2864, R^2 = 0,9825$$

$$\text{MAE} = 0,2308, R^2 = 0,9875$$

$$\text{MAE} = 0,4047, R^2 = 0,9832$$

90



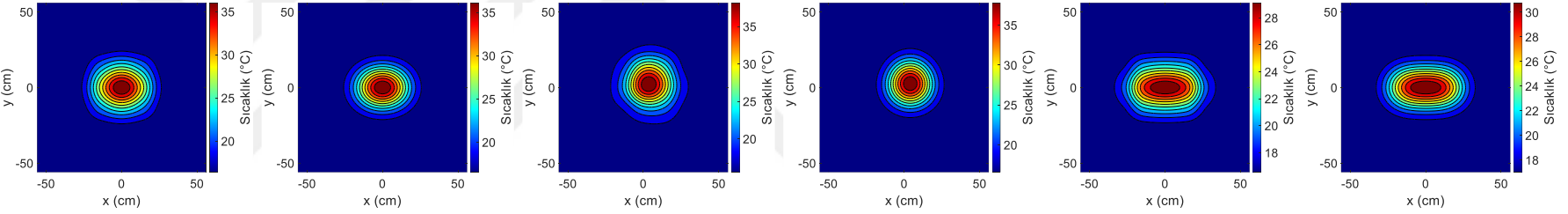
$$\text{MAE} = 0,3080, R^2 = 0,9878$$

$$\text{MAE} = 0,2172, R^2 = 0,9862$$

$$\text{MAE} = 0,4043, R^2 = 0,9795$$

Ek Tablo 2'nin devamı

100

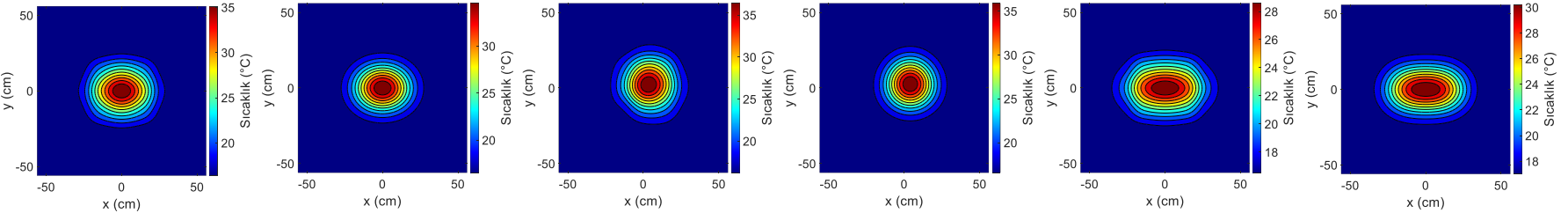


MAE = 0,2545, $R^2 = 0,9809$

MAE = 0,1878, $R^2 = 0,9928$

MAE = 0,4258, $R^2 = 0,9779$

110

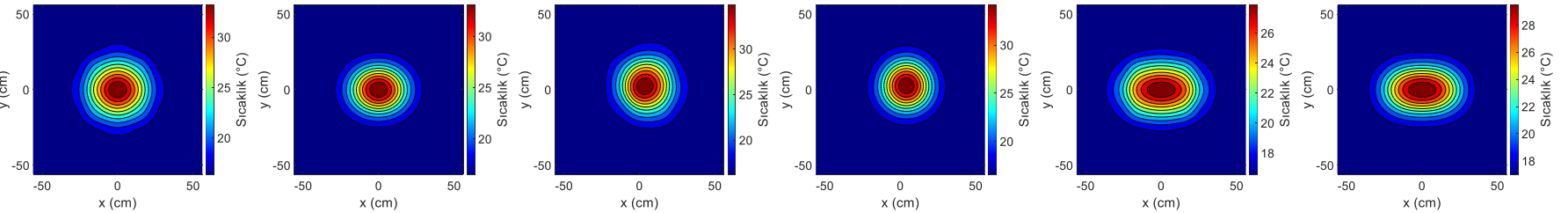


MAE = 0,2364, $R^2 = 0,9841$

MAE = 0,1884, $R^2 = 0,9909$

MAE = 0,4335, $R^2 = 0,9762$

120

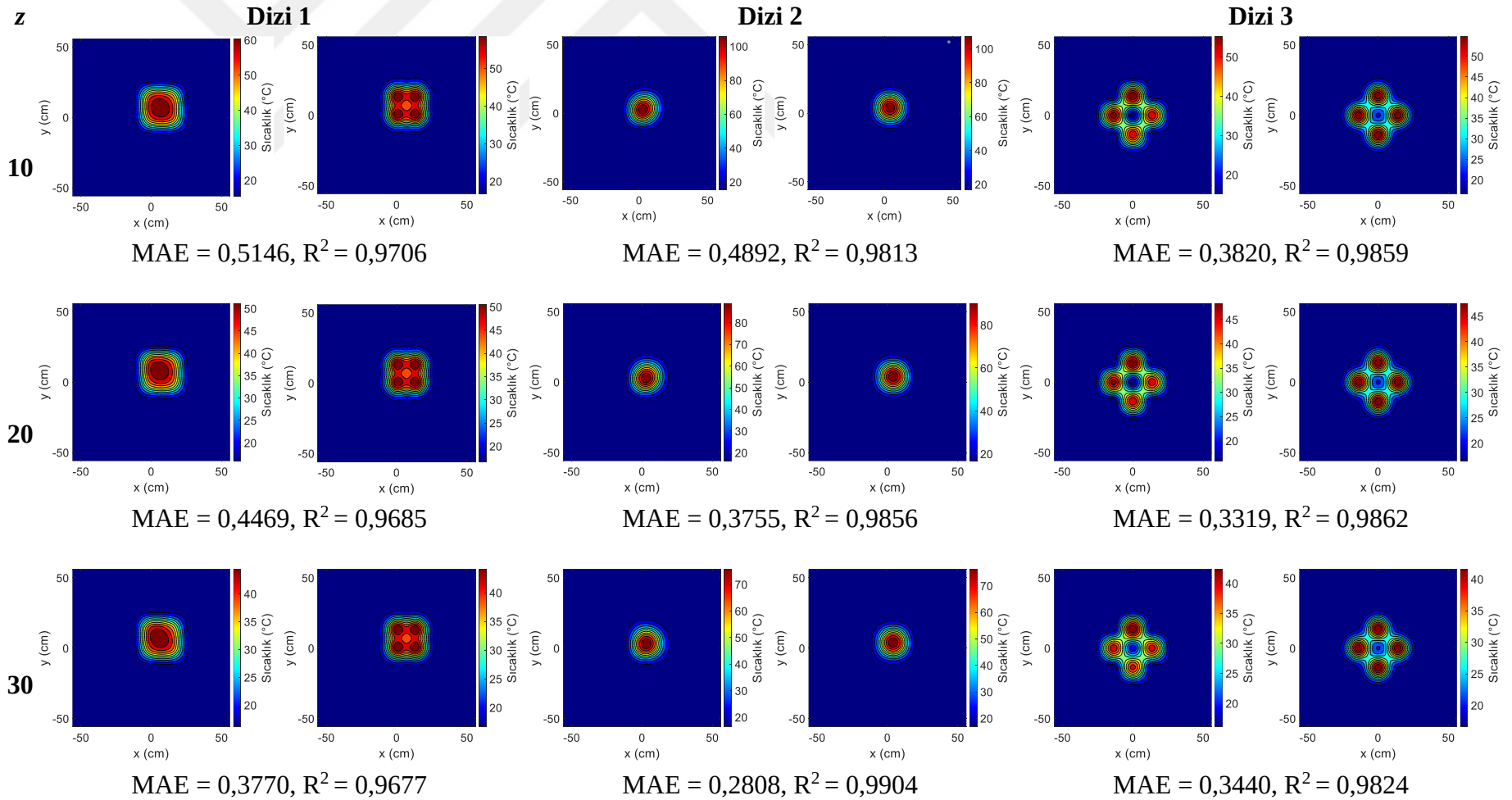


MAE = 0,3291, $R^2 = 0,9625$

MAE = 0,2255, $R^2 = 0,9862$

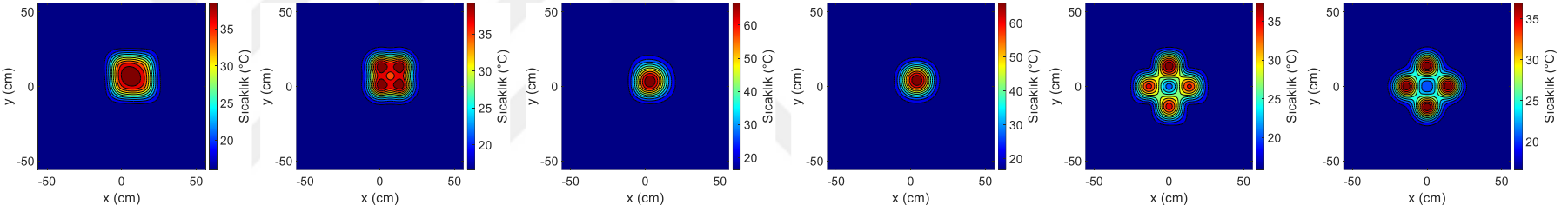
MAE = 0,3813, $R^2 = 0,9786$

Ek Tablo 3. Dört ısıtıcılı dizi sonuçları



Ek Tablo 3'ün devamı

40

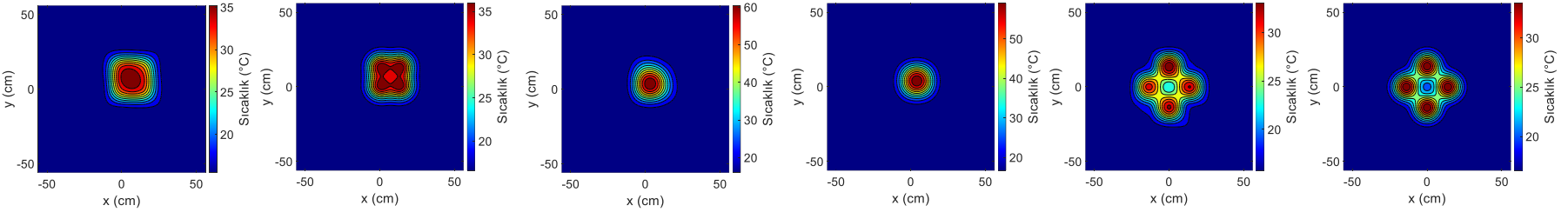


MAE = 0,3807, $R^2 = 0,9624$

MAE = 0,2776, $R^2 = 0,9879$

MAE = 0,3426, $R^2 = 0,9759$

50

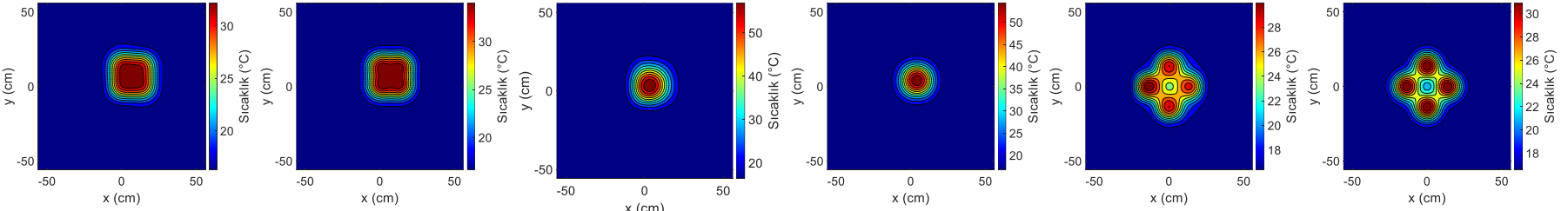


MAE = 0,3737, $R^2 = 0,9608$

MAE = 0,3103, $R^2 = 0,9803$

MAE = 0,2583, $R^2 = 0,9783$

60



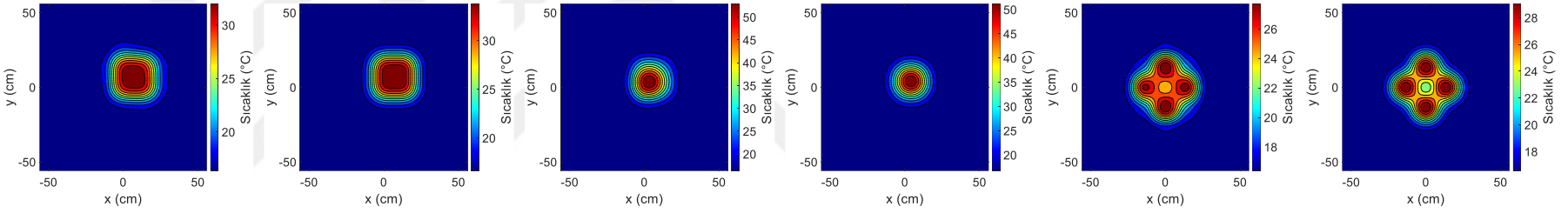
MAE = 0,2534, $R^2 = 0,9751$

MAE = 0,3344, $R^2 = 0,9712$

MAE = 0,2370, $R^2 = 0,9704$

Ek Tablo 3'ün devamı

70

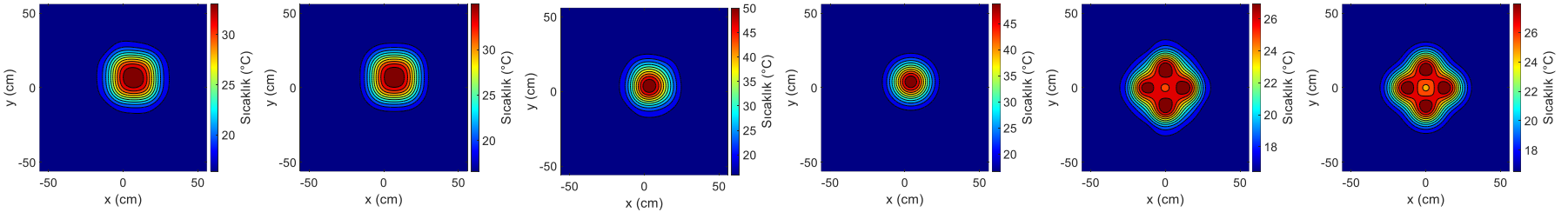


MAE = 0,2283, $R^2 = 0,9759$

MAE = 0,3232, $R^2 = 0,9759$

MAE = 0,2139, $R^2 = 0,9802$

80

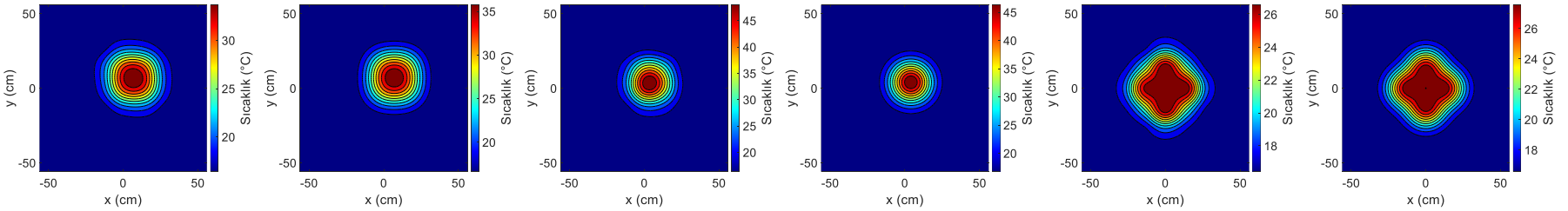


MAE = 0,1957, $R^2 = 0,9821$

MAE = 0,3155, $R^2 = 0,9801$

MAE = 0,1574, $R^2 = 0,9888$

90



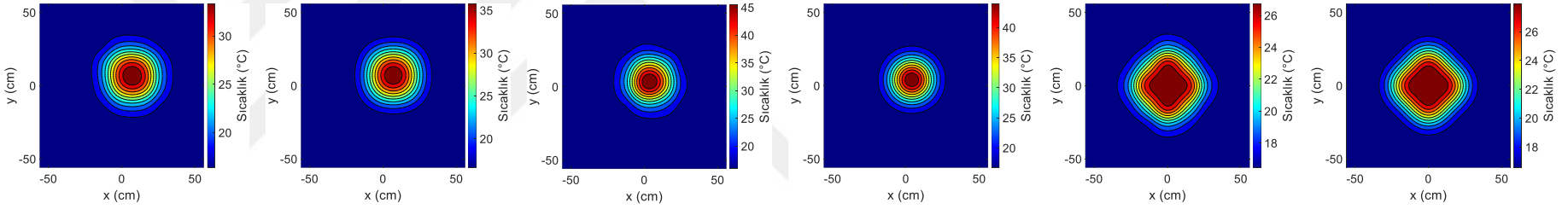
MAE = 0,1880, $R^2 = 0,9851$

MAE = 0,3208, $R^2 = 0,9800$

MAE = 0,1875, $R^2 = 0,9848$

Ek Tablo 3'ün devamı

100

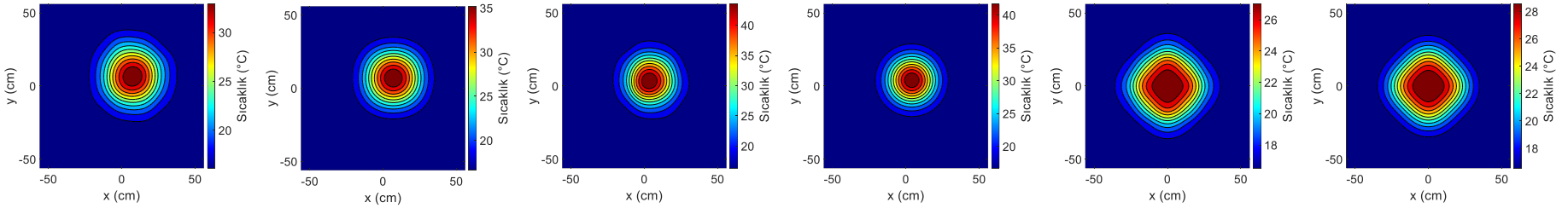


MAE = 0,2140, $R^2 = 0,9798$

MAE = 0,3139, $R^2 = 0,9821$

MAE = 0,2116, $R^2 = 0,9759$

110

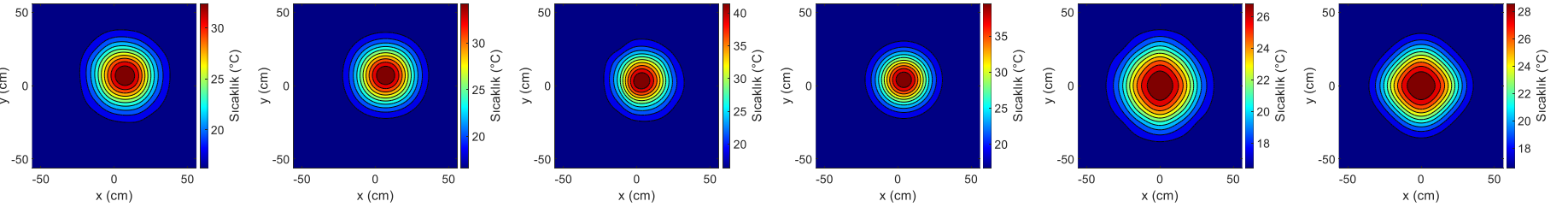


MAE = 0,2030, $R^2 = 0,9835$

MAE = 0,3212, $R^2 = 0,9792$

MAE = 0,2096, $R^2 = 0,9711$

120

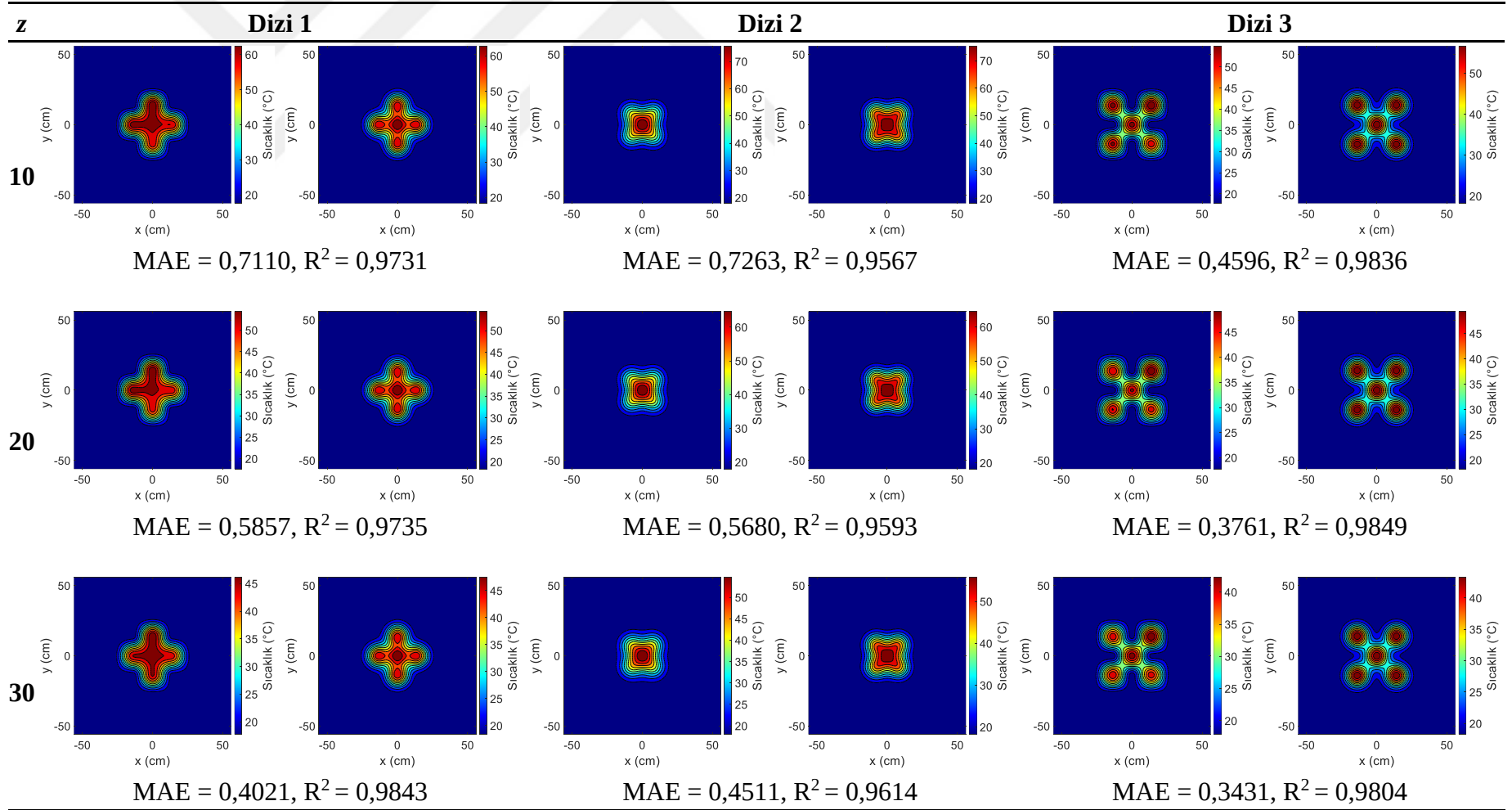


MAE = 0,1734, $R^2 = 0,9876$

MAE = 0,3300, $R^2 = 0,9761$

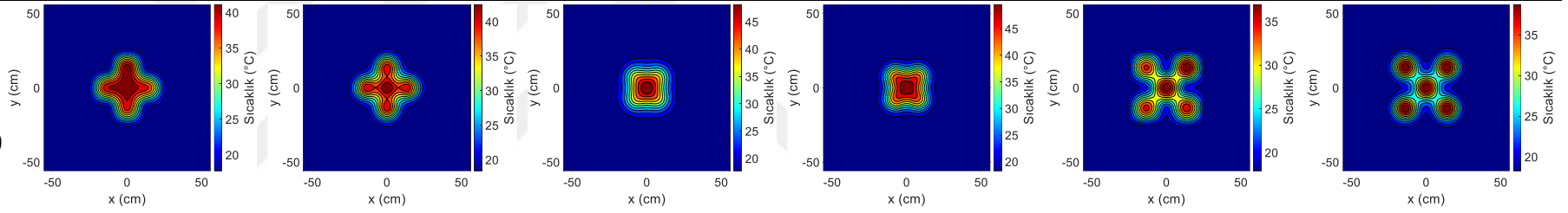
MAE = 0,2396, $R^2 = 0,9645$

Ek Tablo 4. Beş ısıtıcılı dizi sonuçları



Ek Tablo 4'ün devamı

40

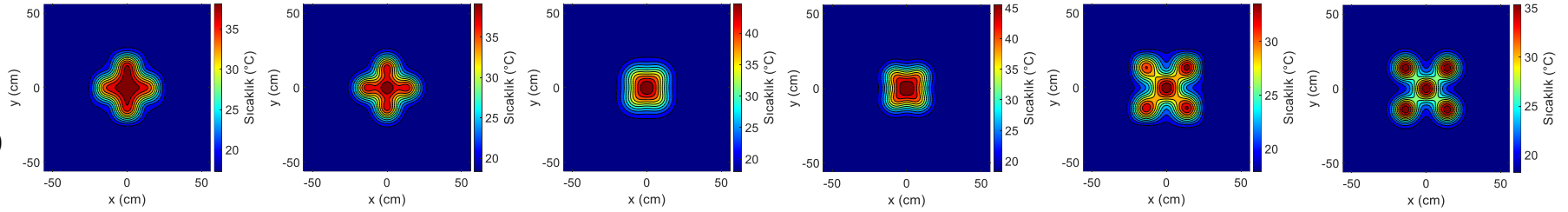


MAE = 0,3626, $R^2 = 0,9879$

MAE = 0,3398, $R^2 = 0,9720$

MAE = 0,3369, $R^2 = 0,9683$

50

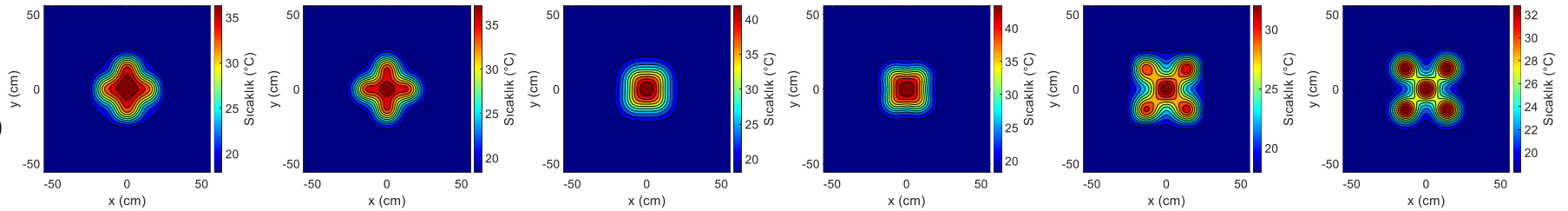


MAE = 0,3514, $R^2 = 0,9898$

MAE = 0,2543, $R^2 = 0,9837$

MAE = 0,3727, $R^2 = 0,9544$

60



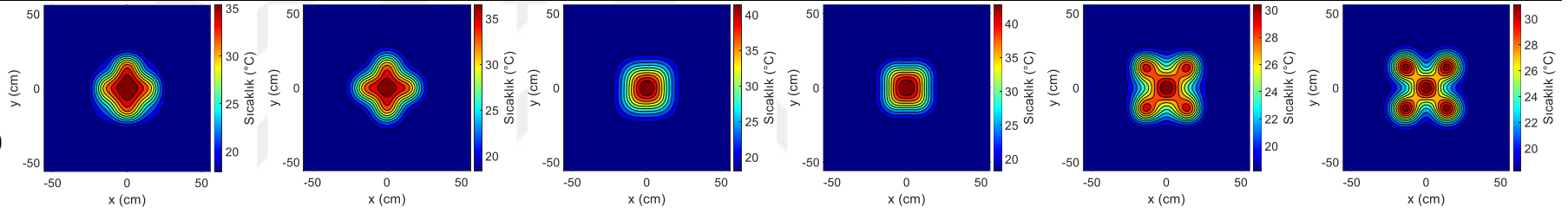
MAE = 0,2900, $R^2 = 0,9930$

MAE = 0,2465, $R^2 = 0,9852$

MAE = 0,3719, $R^2 = 0,9507$

Ek Tablo 4'ün devamı

70

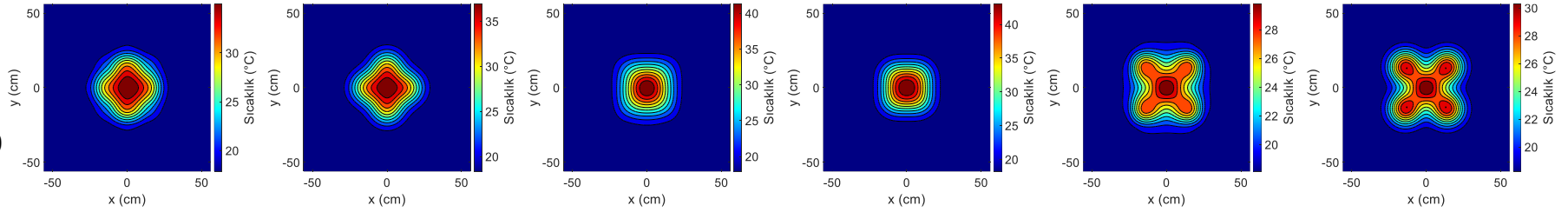


MAE = 0,3238, $R^2 = 0,9910$

MAE = 0,2051, $R^2 = 0,9898$

MAE = 0,2786, $R^2 = 0,9685$

80

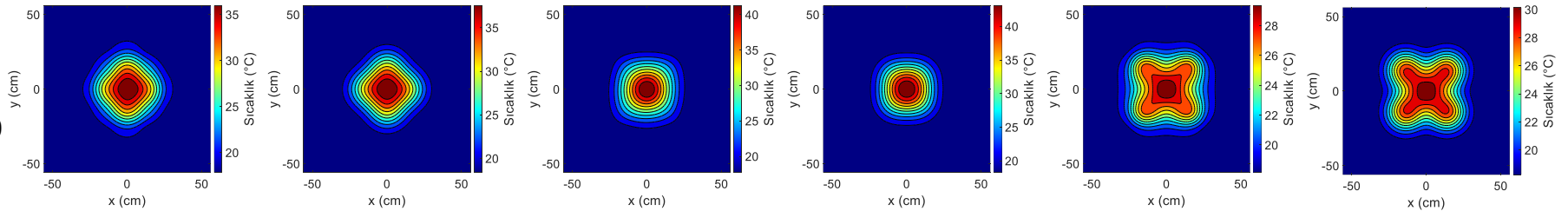


MAE = 0,3613, $R^2 = 0,9826$

MAE = 0,2241, $R^2 = 0,9877$

MAE = 0,2657, $R^2 = 0,9754$

90



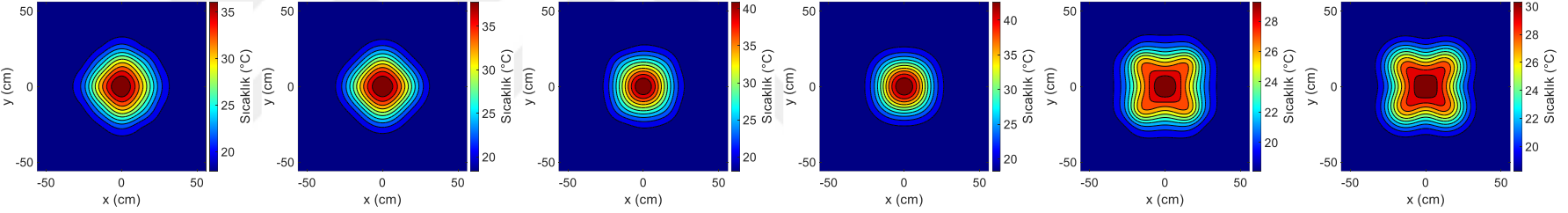
MAE = 0,2988, $R^2 = 0,9901$

MAE = 0,1879, $R^2 = 0,9898$

MAE = 0,2493, $R^2 = 0,9795$

Ek Tablo 4'ün devamı

100

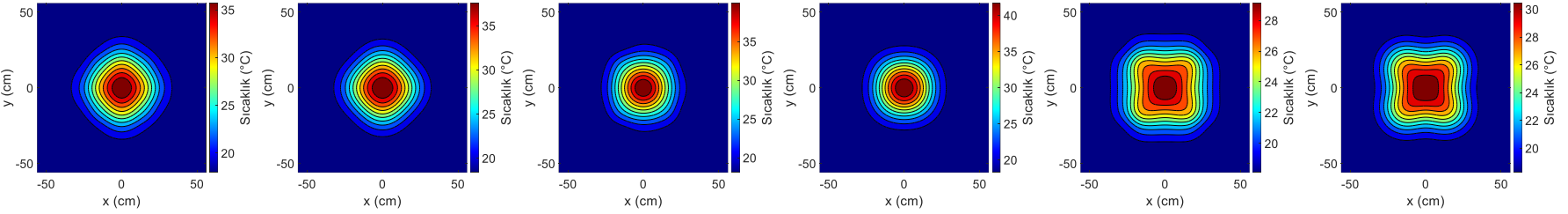


MAE = 0,3220, $R^2 = 0,9853$

MAE = 0,1813, $R^2 = 0,9908$

MAE = 0,2965, $R^2 = 0,9725$

110

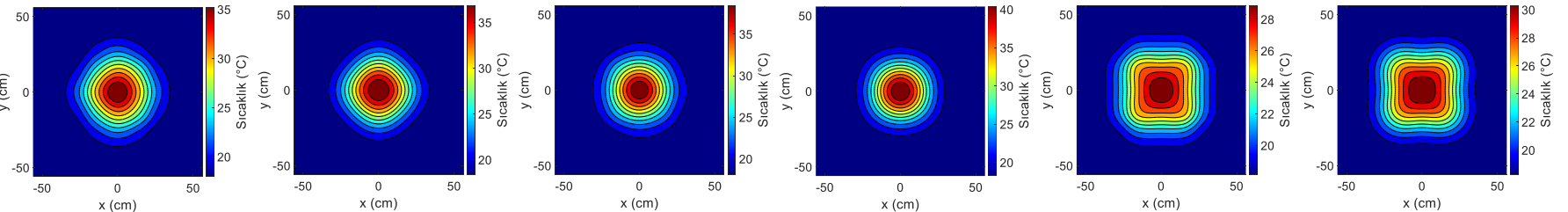


MAE = 0,3321, $R^2 = 0,9819$

MAE = 0,2097, $R^2 = 0,9881$

MAE = 0,3146, $R^2 = 0,9661$

120

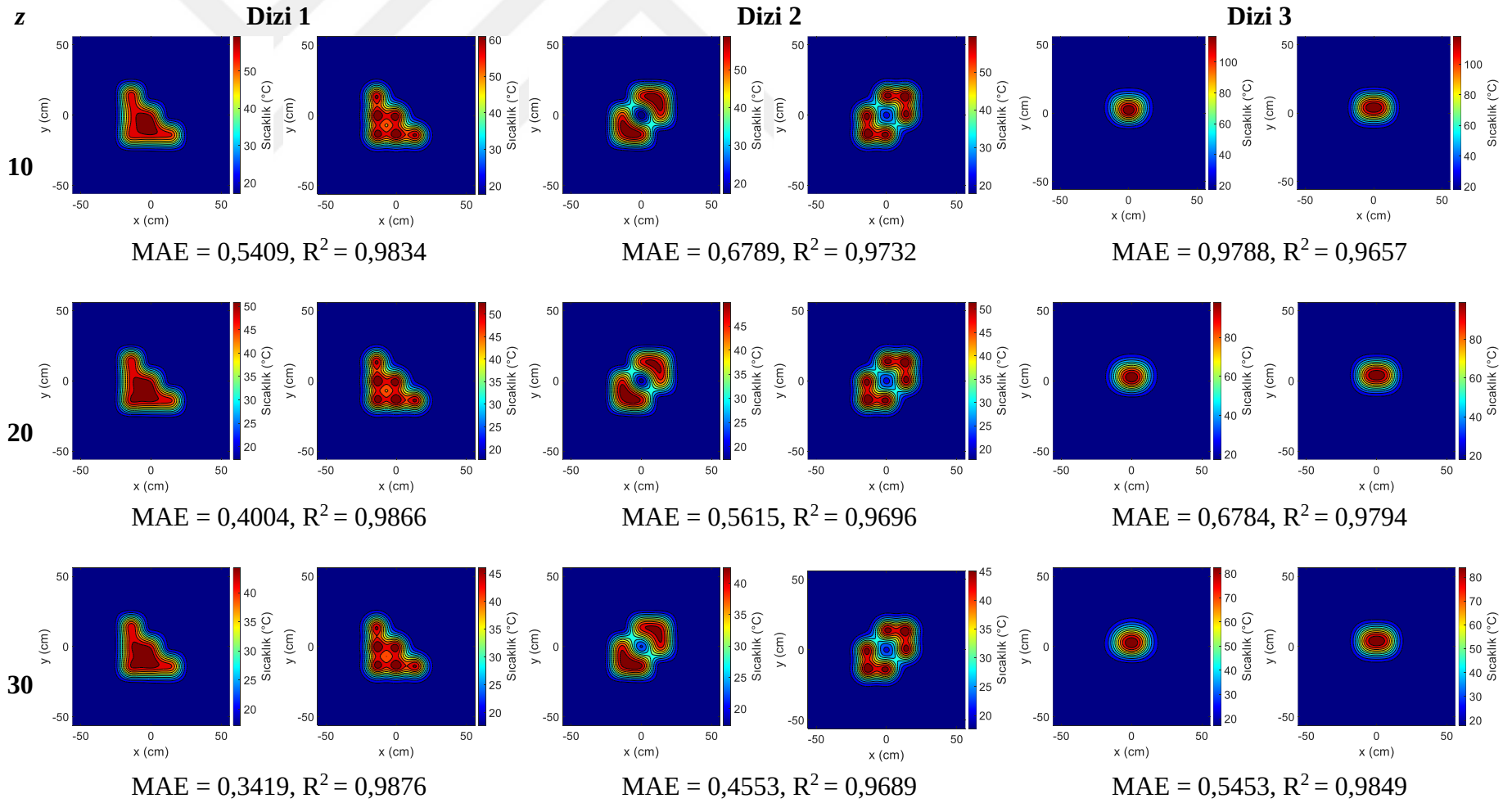


MAE = 0,3052, $R^2 = 0,9840$

MAE = 0,2261, $R^2 = 0,9862$

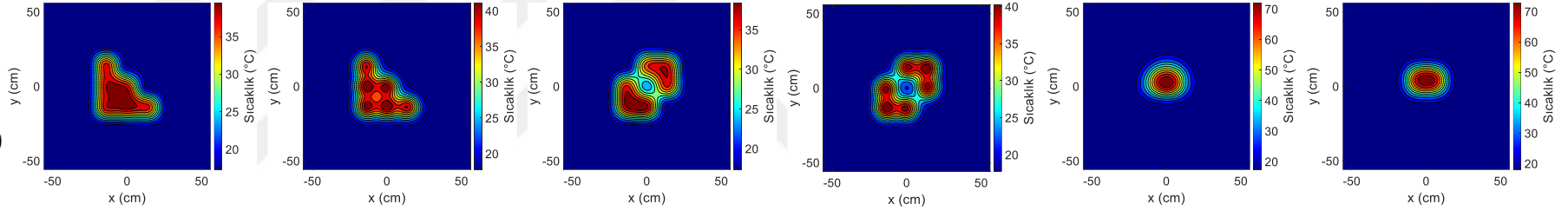
MAE = 0,3277, $R^2 = 0,9627$

Ek Tablo 5. Altı ısıtıcılı dizi sonuçları



Ek Tablo 5'in devamı

40

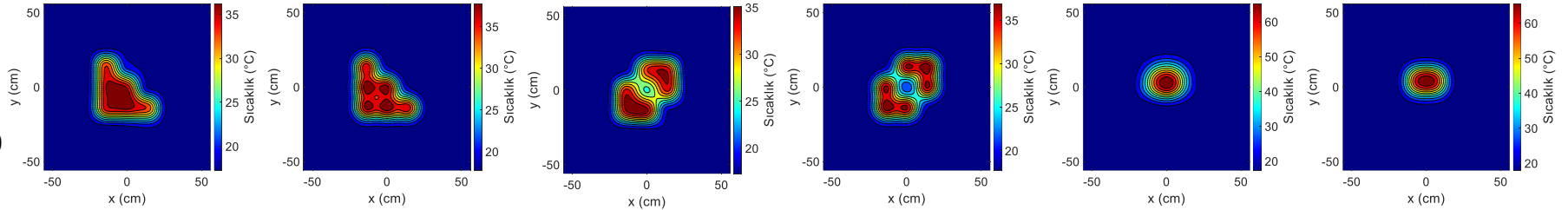


MAE = 0,3074, $R^2 = 0,9866$

MAE = 0,4548, $R^2 = 0,9648$

MAE = 0,4726, $R^2 = 0,9881$

50

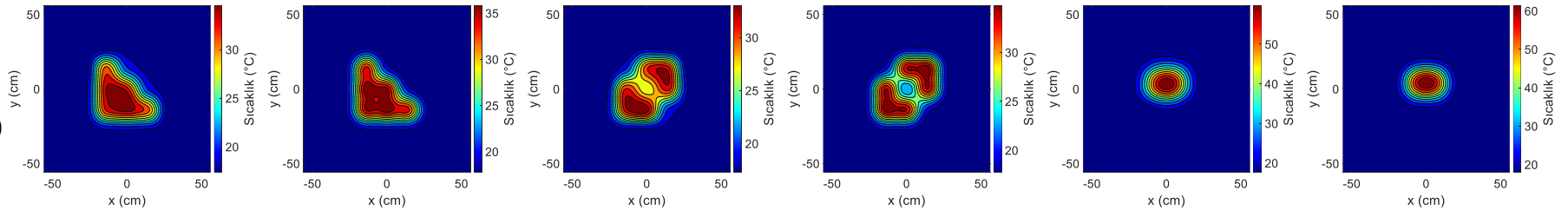


MAE = 0,3329, $R^2 = 0,9836$

MAE = 0,4371, $R^2 = 0,9611$

MAE = 0,3995, $R^2 = 0,9888$

60



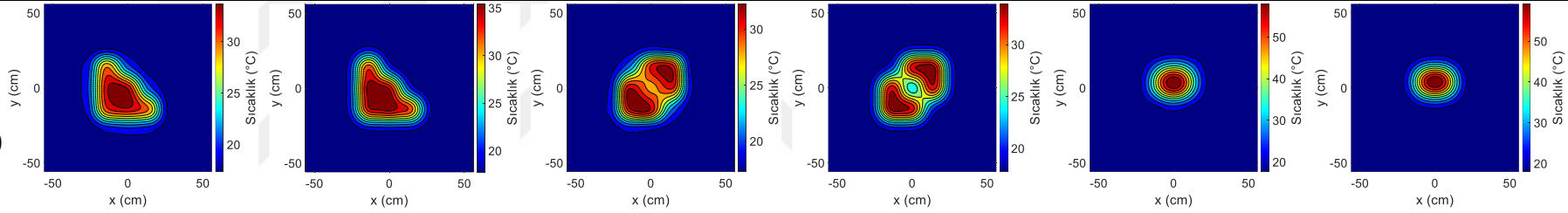
MAE = 0,3368, $R^2 = 0,9797$

MAE = 0,4308, $R^2 = 0,9575$

MAE = 0,2337, $R^2 = 0,9956$

Ek Tablo 5'in devamı

70

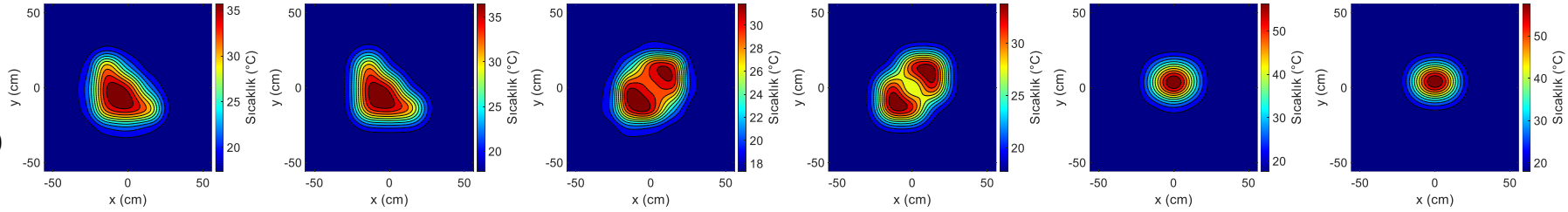


MAE = 0,3757, $R^2 = 0,9677$

MAE = 0,3691, $R^2 = 0,9691$

MAE = 0,2292, $R^2 = 0,9966$

80

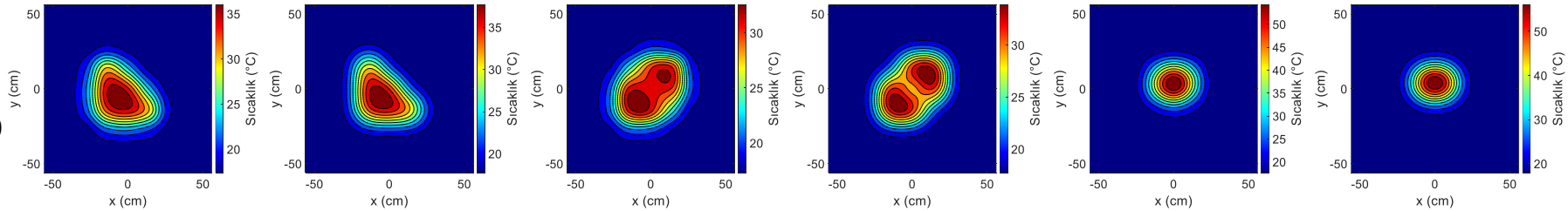


MAE = 0,2327, $R^2 = 0,9950$

MAE = 0,3849, $R^2 = 0,9681$

MAE = 0,2608, $R^2 = 0,9968$

90



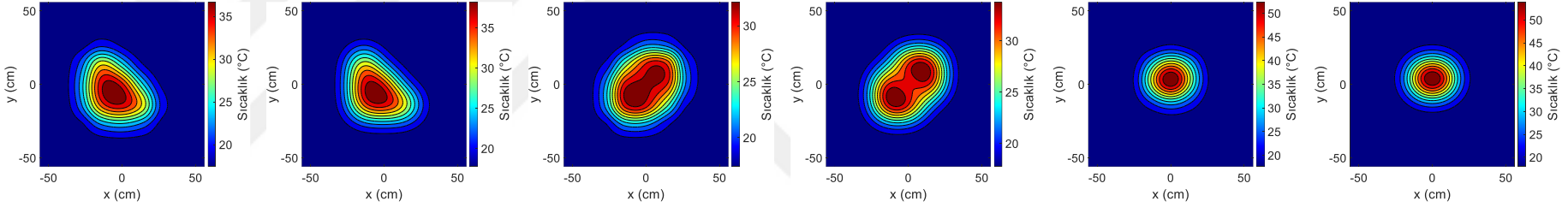
MAE = 0,2742, $R^2 = 0,9909$

MAE = 0,3122, $R^2 = 0,9810$

MAE = 0,2683, $R^2 = 0,9959$

Ek Tablo 5'in devamı

100

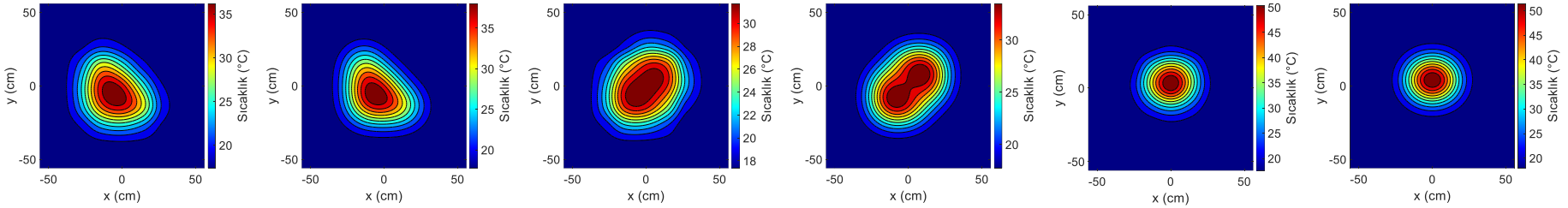


MAE = 0,2454, $R^2 = 0,9929$

MAE = 0,3219, $R^2 = 0,9783$

MAE = 0,3032, $R^2 = 0,9955$

110

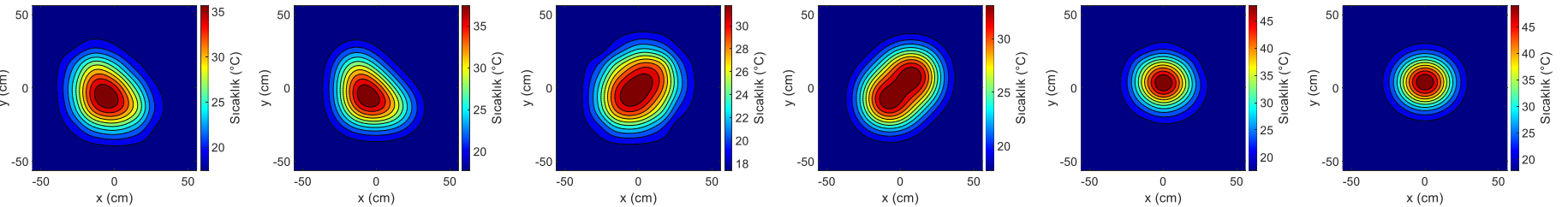


MAE = 0,2689, $R^2 = 0,9903$

MAE = 0,3799, $R^2 = 0,9714$

MAE = 0,3280, $R^2 = 0,9950$

120



MAE = 0,2644, $R^2 = 0,9895$

MAE = 0,3799, $R^2 = 0,9702$

MAE = 0,3048, $R^2 = 0,9955$

ÖZGEÇMİŞ

Doğan Can SAMUK, ilkokul öğrenimini Fatih İlköğretim Okulu'nda ve ortaokul öğrenimini Bener Cordan İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise öğrenimini 2009 yılında Yunus Emre Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2014 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2017 yılında yüksek lisans öğrenimini tamamlamasının ardından takip eden yıl içerisinde doktora eğitimine başladı. 2016 yılından beri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

SCI, SSCI ve AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayınlanan Makaleler:

1. Samuk, D. C., & Cakir, O. (2025). The Realization of a Three-Dimensional Temperature Measurement System with a Two-Dimensional Sensor Array and the Demonstration of the Deformation Effect of Gravity on the Heating Patterns. *Sensors*, 25(1), 198. <https://doi.org/10.3390/s25010198>
2. Samuk, D. C., & Nuroğlu, F. M. (2021). A new wide area-based algorithm to determine faulted line in series-compensated grid using k-nearest neighbor (k-NN) classification method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(2), 871–882. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.640572>